

Implementação de uma *Learning Factory*

U.B.I. Lighthouse Learning Factory

Versão final após defesa

André Filipe da Silva Abel

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial
(2º ciclo de estudos)

Orientadora: Prof. Doutora Susana Maria Palavra Garrido Azevedo
Co-orientadora: Prof. Doutora Tânia Daniela Felgueiras de Miranda Lima

Agosto de 2020

Agradecimentos

A realização deste trabalho teve o suporte de algumas pessoas às quais gostaria de deixar umas palavras de apreço.

Às orientadoras, Prof. Doutora Tânia Lima e Prof. Doutora Susana Azevedo, pelo acompanhamento ao longo de dois anos e meio, estando sempre dedicadas à revisão do meu trabalho, mesmo que o processo não tenha sido fluido, contribuindo sempre com ideias e diversas retificações no sentido de o potencializar.

Um agradecimento especial aos meus pais, ao meu irmão e cunhada, pelo apoio motivacional, sem eles não teria iniciado este mestrado na Universidade da Beira Interior.

À Lérída Ximbi pela revisão gramatical do trabalho e pela constante pressão para concluir o presente trabalho.

Por último, um agradecimento a todos os meus colegas de mestrado, especialmente à Ludmila Diniz, Mariana Lourenço, Mariana Carlota e ao Hervê Disadidi por terem tornado este Mestrado numa experiência de vida ainda mais interessante.

A todos o meu muito obrigado.

Resumo

Atualmente a indústria mundial, devido à globalização encontra-se sobre uma pressão constante no sentido de melhorar as suas competências para que os seus modelos de negócios sejam mais rentáveis e competitivos, deste modo esta situação tornou-se impulsionadora de uma 4ª Revolução Industrial, associada a um mosaico tecnológico no qual se destaca a Internet das Coisas e os Sistemas Ciber-Físicos, com intuito de diminuir os custos operativos das empresas, tornando-as mais eficientes e competitivas.

A Indústria 4.0 e os seus conceitos associados são novos, gerando necessidades de formação para os futuros profissionais e para aqueles que estão no ativo, sob pena de não serem implementados eficientemente. O conceito *Learning Factory*, apesar de recente é considerado um processo eficaz de formação, treino e investigação através de um modelo prático que transpõe a realidade da indústria, podendo ser uma peça-chave no processo de transição para este novo paradigma.

O presente trabalho tem como objetivo apresentar uma proposta de implementação de uma *Learning Factory* assente no contexto da Indústria 4.0, na Universidade da Beira Interior, com base de prototipagem rápida.

A proposta de transformação do FabLab numa *Learning Factory*, pode servir de *guideline* para um futuro projeto de investimento, pois está alinhada com a bibliografia publicada recentemente, onde se pôde verificar que existem diversas iniciativas governamentais e empresariais para implementação da Indústria 4.0, assim como se observou a proliferação das *Learning Factories* mundialmente, servindo como base justificativa para este investimento.

Palavras-chave

Indústria 4.0; *Learning Factory*; Prototipagem; Produção Aditiva

Abstract

Nowadays the world industry, due to globalization is under constant pressure to improve their competencies in order their business models are more profitable and competitive, thus this situation has become the driver of a 4th Industrial Revolution, associated with a technological mosaic in which stands out the Internet of Things and the Cyber-Physical Systems, towards to reduce the operating costs of companies, making them more efficient and competitive.

The Industry 4.0 and his associated concepts are new, producing training needs for the future professionals and for the current assets, otherwise, they will not be implemented efficiently. The Learning Factory concept, although recent, is considered an effective process of teaching, training and investigation through a practical model that transposes the reality of the industry, being able to be a key piece in the transition process for this new paradigm.

The aim of this work is to present a proposal for the implementation of a Learning Factory based on the context of Industry 4.0, at the Universidade da Beira Interior, linked to rapid prototyping.

FabLab's proposal to transform into a Learning Factory can serve as a guideline for a future investment project, as it is aligned with the recently published bibliography, where it was possible to verify that there are several governmental and business initiatives for the implementation of Industry 4.0, as well as the proliferation of Learning Factories worldwide, serving as a basis for this investment.

Keywords

Industry 4.0; Learning Factory; Prototyping; Additive Manufacturing

Índice

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xvii
Lista de Acrónimos.....	xix
1. Introdução	1
1.1 Contextualização do Trabalho Desenvolvido	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Estrutura da Dissertação	3
2. Indústria 4.0.....	5
2.1 Evolução Histórica da Indústria.....	5
2.2 Motivações para a 4 ^a Revolução Industrial	6
2.3 Estratégias Para Alcançar a 4 ^a Revolução Industrial.....	7
2.4 Definição de Indústria 4.0.....	8
2.5 Características da Indústria 4.0	9
2.6 Tecnologias Chave da Indústria 4.0	12
2.6.1. CPS (<i>Cyber Physical Systems</i>) – Sistemas Ciber-Físicos.....	12

2.6.2.	A Internet das Coisas (IoT) e a Internet dos Serviços (IoS)	13
2.7	Aplicações da Indústria 4.0.....	14
2.7.1.	Fábricas Inteligentes.....	14
2.7.2.	Produto Inteligente	15
2.8	Impacto da Indústria 4.0	16
3.	<i>Learning Factories</i>	19
3.1	A Importância do Ensino	19
3.2	Contexto Histórico	20
3.3	Morfologias e Tipologias das <i>Learning Factories</i>	22
3.4	Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP	23
3.5	Definição de <i>Learning Factory</i>	25
3.6	Análise e Configuração de uma <i>Learning Factory</i>	27
3.7	<i>Learning Factories</i> Existentes – Propósitos, Conceitos e Aplicações	28
3.7.1.	<i>Learning Factories</i> – Propósito Ensino	29
3.7.2.	<i>Learning Factories</i> – Propósito Treino.....	30
3.7.3.	<i>Learning Factories</i> – Propósito Investigação	30
3.7.4.	Exemplos de <i>Learning Factories</i> Existentes	31
3.8	<i>Learning Factories</i> e a Indústria 4.0	39
3.9	Relação entre o Ensino e Indústria em Portugal	40
4.	Prototipagem Rápida	43
4.1	Justificação.....	43

4.2	Introdução	43
4.3	Processo Aditivos com Materiais Líquidos.....	46
4.3.1.	SLA - Estereolitografia	46
4.3.2.	Polijato	48
4.4	Processo Aditivos com Utilização de Pós	48
4.4.1.	3DP (3D <i>Printing</i>) – Impressão 3D	49
4.4.2.	SLS – Sinterização a Laser Seletiva	50
4.5	Processos Aditivos com Utilização de Filamentos	51
4.5.1.	FDM (<i>Fused Deposition Modeling</i>) – Modelagem de Depósito Fundido	52
4.5.2.	Bio-impressão 3D.....	52
4.6	Processo Aditivo com Utilização de Folhas.....	53
4.6.1.	LOM – Fabricação de Objeto Laminado.....	54
4.7	Prototipagem Rápida e Indústria 4.0.....	55
5.	Proposta de Implementação de uma <i>Learning Factory</i>	57
5.1	Descrição do FabLab U.B.I.	58
5.1.1.	Equipamentos FabLab U.B.I.....	59
5.2	Seleção de Produto Serviço	64
5.3	Unidades Curriculares.....	66
5.4	Estrutura da U.B.I. 2L.F.....	68
5.4.1.	Dimensionamento da Capacidade	69
5.4.2.	Calendarização	71

5.4.3.	Corpo Técnico	71
5.5	Propostas de Melhoria e Modificação de <i>Layout</i>	72
5.5.1.	1ª Proposta de Modificação – Alteração Espaço de Formação	73
5.5.2.	2ª Proposta de Modificação – Alteração do Gabinete.....	75
5.5.3.	3ª Proposta de Modificação – De Arrumos para Espaço de Produção Aditiva.....	76
5.5.4.	4ª Proposta de Modificação – Implementação de Metrologia Dimensional	77
5.6	Notas Conclusivas e Definição da L.F.	78
6.	Conclusões.....	81
	Referências Bibliográficas.....	85
	Anexo 1 – Primeira Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Modelo Operacional – Adaptado de Tisch et al., 2015a.....	97
	Anexo 2 – Segunda Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Propósitos – Adaptado de Tisch et al., 2015a	98
	Anexo 3 – Terceira Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Processos – Adaptado de Tisch et al., 2015a.....	99
	Anexo 4 – Quarta Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Configuração – Adaptado de Tisch et al., 2015a.....	100
	Anexo 5 – Quinta Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Produto – Adaptado de Tisch et al., 2015a	101
	Anexo 6 – Sexta Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Didática – Adaptado de Tisch et al., 2015a.....	102
	Anexo 7 – Sétima Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Métricas – Adaptado de Tisch et al., 2015a	103
	Anexo 8 – Planta Original do FabLab – Elaboração Própria	104

Anexo 9 – Proposta de Modificação da Planta do FabLab – Elaboração Própria	105
--	-----

Lista de Figuras

Figura 1 – As 4 revoluções industriais.....	6
Figura 2 – Interligação dos componentes da Indústria 4.0	10
Figura 3 – Evolução temporal de artigos ligados aos termos Learning Factory / Lernfabrik e Teaching factory no Google Scholar	21
Figura 4 – Dimensões definitórias de L.F.	26
Figura 5 – Transformações didáticas e níveis conceptuais para a configuração de uma L.F.	28
Figura 6 – Treino Pneumático (1980), 1º MPS (1988), 4º MPS(2017);	34
Figura 7 – iCIM(2005) e CP Factory(2016)	35
Figura 8 – Produtos – (a)1ª MPS, (b)4ª MPS, (c) Kit Secretária, (d) Dispositivo eletrónico	35
Figura 9 – Relação Universidades e Indústria	42
Figura 10 – Relevância comercial das tecnologias RP por área de negócio.....	44
Figura 11 – Classificação dos processo RP de acordo com estado físico da matéria-prima	45
Figura 12 – Carecterísticas principais dos processos RP com utilização de líquidos	46
Figura 13 – Processo SLA	47
Figura 14 – Processo Polijato	48
Figura 15 – Carecterísticas principais dos processos RP com utilização de pós.....	49
Figura 16 – Processo 3DP	50
Figura 17 – Processo SLS.....	51

Figura 18 – Carecterísticas principais dos processos RP com utilização de filamentos.....	51
Figura 19 – Processo FDM	52
Figura 20 – Processo Bio-Impresão 3D.....	53
Figura 21 – Carecterísticas principais do processo LOM com utilização de folhas	54
Figura 22 – Processo LOM.....	55
Figura 23 – Localização FabLab na Faculdade de Engenharia da U.B.I	59
Figura 24 – <i>Layout</i> original do hangar.....	73
Figura 25 – Proposta para 1ª alteração ao <i>layout</i> original do hangar	74
Figura 26 – Proposta para a 2ª Alteração ao <i>layout</i> do hangar	75
Figura 27 – Proposta de alteração do <i>layout</i> do gabinete	76

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Modelos de classificação de L.F.	23
Tabela 2 – Cobertura das dimensões de acordo com as definições de Learning Factory...	25
Tabela 3 – Morfologias da AutFab de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP	32
Tabela 4 – Morfologias das Festo Didatic L.F. de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP	35
Tabela 5 – Morfologias da iFactory de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP	38
Tabela 6 – Morfologias da MPS Lernplattform de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP	39
Tabela 7 – Comparação das características chave das tecnologia RP	46
Tabela 8 – Principais máquinas do FabLab de acordo com o processo produtivo.....	60
Tabela 9 – Centro de maquinagem vertical CNC	61
Tabela 10 – Torno CNC	61
Tabela 11 – Máquina de corte por jato de água	61
Tabela 12 – Router de 3 eixos.....	62
Tabela 13 – Serrote de fita	62
Tabela 14 – Engenho de Furar	62
Tabela 15 – Impressora 3D – FDM	62
Tabela 16 – Scanner 3D.....	63
Tabela 17 – Multi-Estação medição 3D.....	63

Tabela 18 – Prensa vácuo para termoformagem	64
Tabela 19 – Unidades curriculares do curso de E.G.I.	67
Tabela 20 – Unidades curriculares do curso Design Industrial	67
Tabela 21 – Numero de vagas anuais em 2019 por curso alvo	69
Tabela 22 – Morfologias da U.B.I. 2L.F. de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP	79

Lista de Acrónimos

3DP	3D Printing
AMP	Advanced Manufacturing Partnership
ASRS	Automated Storage and Retrieval System
CAD	Computer Aided Design
CFI	Canada Foundation for Innovation
CIM	Computer-Integrated Manufacturing
CIP	Confederação Empresarial de Portugal
CIRP	Collège International pour la Recherche en Productique
C-MAST	Centro para Ciências e Tecnologias Aeroespaciais
CMM	Coordinate-measuring machine
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CPPS	Cyber Physical Production Systems
CPS	Cyber Physical Systems
CRC	Canada Research Chairs
CWG	Collaborative Working-Groups
DGES	Direção-Geral de Ensino Superior
E.U.A.	Estados Unidos da América
ERP	Enterprise Resource Planning
FabLab	Laboratório de Fabricação da UBI
FDM	Fused Deposition Modelling
FoF	Factories of the Future
HEPA	High Efficiency Particulate Arrestance
HMI	Human Machine Interface
I 4.0	Indústria 4.0
I&D	Investigação & Desenvolvimento
IIC	Industrial Internet Consortium
IIoT	Internet Industrial of Things
IoS	Internet of Services
IoT	Internet of Things
IWN	Internet Wireless Network
L.F.	Leaning Factories
LM	Layered Manufacturing
LOM	Laminated Object Manufacturing

MES	Manufacturing Execution System
MPS	Modular Production System
MRI	Ministry of Research Innovation and Science
NIL	Network of Innovative Learning Factories
NSERC	Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada
NSF	National Science Foundation
PIB	Produto Interno Bruto
PLC	Power Line Communication
RFID	Radio Frequency Identification
RIE	Research, Innovation and Enterprise
RM	Rapid Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RT	Rapid Tolling
SCADA	Supervisory Central and Data System Acquisition
SLA	Stereolithography
SLS	Sinterização a Laser Seletiva
STEM	Science, Technology, Engineering and Mathematics
TI	Tecnologias de Informação
TICLs	Tecnologias de Informação, Comunicação e Localização
TPS	Toyota Production System
UBI	Universidade da Beira Interior
UBI 2LF	UBI Lighthouse Learning Factory
UV	Ultravioleta
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia

1. Introdução

O capítulo introdutório do presente trabalho, que visa propor a implementação de uma *Learning Factory* (L.F.) tem como objetivos contextualizar o trabalho, apresentar os seus objetivos e metodologia, assim como apresentar a forma como este está estruturado.

1.1 Contextualização do Trabalho Desenvolvido

É um facto que o quanto maior o nível educacional melhor será o nosso desempenho enquanto sociedade, pois as sociedades funcionam como um sistema repleto de milhões de engrenagens, na qual os indivíduos com mais capacidades, podem tornar as empresas mais competitivas, criando economias e sociedades mais robustas, desta forma pode-se concluir que o capital humano é uma peça chave para o desenvolvimento económico, especialmente numa fase onde se inicia uma nova revolução industrial (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

Ao longo da história, as revoluções industriais que ocorreram provocaram sempre uma disrupção no paradigma tecnológico e produtivo, onde em cada uma delas foram introduzidas novas tecnologias que mudaram o mundo de uma forma irreversível, especialmente no universo industrial: um dos exemplos foi o início da produção em massa de um produto complexo a um custo baixo através das linhas de montagem, implementado por Henry Ford no início do século XX (Mokyr, 1998).

Estas disrupções foram possibilitadas através de uma cooperação e integração de conhecimento proveniente de diferentes áreas científicas, onde as inovações são geradas através da interface entre elas, ou seja, do ponto de vista cronológico das revoluções industriais, a mecânica pura associada à primeira revolução aliou-se com a eletrónica e posteriormente às ciências da computação, possibilitando assim novos processos e produtos (Abele & Reinhart, 2011).

Uma das inovações ligada à interface das áreas científicas prende-se com a 4^a revolução industrial e consequentemente com a Indústria 4.0, através da qual a visão de fábrica será completamente remodelada, na qual os seus equipamentos estarão ligados em rede e os seus produtos saberão encontrar o caminho para a sua finalização, onde naturalmente o papel dos seres humanos mudará, pois existirá uma redução das atividades de rotina e até as próprias decisões serão baseadas em algoritmos e no tratamento de grandes bases de dados (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

A nova visão de fábrica descrita assenta em diversos avanços em nove áreas diferentes, descritas como os 9 pilares da Indústria 4.0, nomeadamente, a *Big Data* e respetiva análise (*Big data analytics*), os robots autónomos, a simulação, a integração horizontal e vertical de sistemas, a Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT), a Cibersegurança, os Processos através *Cloud Computing*, a Realidade Virtual e Aumentada e a Produção Aditiva (Vaidya, Ambad & Bhosle, 2018).

O último pilar mencionado, o pilar da produção aditiva, refere-se a uma tecnologia a qual permite que projetos tridimensionais possam ser construídos diretamente de um ficheiro CAD (Computer Aided Design), sem o recurso a ferramentas ou matrizes específicas para cada produto, permitindo deste modo criar lotes de componentes flexíveis e customizados às necessidades dos clientes desde a fase de prototipagem à produção em série, permitindo aumentar a competitividade industrial, sendo este um dos objetivos do processo de transformação para a Indústria 4.0 (Vaidya, Ambad & Bhosle, 2018).

A Indústria 4.0 trará novos desafios para todos os envolvidos neste processo de transformação que a indústria atravessa, onde será esperado um nível completamente distinto de *know-how*. Para isso será necessário um método adequado e eficaz para a formação e treino, onde as *Learning Factories* aparecem como um método a ser utilizado quer para o desenvolvimento de conhecimentos teóricos, como de conhecimentos práticos, através de um ambiente produtivo semelhante à realidade (Baena, Guarin, Mora, Sauza & Retat, 2017).

De acordo com Goerke, Schmidt, Busch & Nyhuis (2015), a parte do conhecimento que é assimilado pela memória depende da forma como este é experienciado, ou seja, se a aquisição for auditiva será absorvido 10%, visual 20%, visual e auditiva 40% e prática 80%. Tendo em conta esta afirmação, o processo de aprendizagem numa *Learning Factory* torna-se uma opção válida em comparação com os métodos convencionais de aprendizagem, pois o ambiente é de aprendizagem experimental dando aos formandos uma visão distinta de ensino, desenvolvendo-lhes de uma forma diferente as capacidades de perceção e pensamento (Efstratia, 2014).

O conceito de *Learning Factory* tornou-se bastante popular ao longo dos últimos anos e desde o seu aparecimento em 1994 foram implementadas diferentes soluções em todo mundo assumindo formas diferentes com o intuito de intensificar a experiência de aprendizagem dos participantes (Abele et al., 2015). Este conceito é de extrema importância, pois no ensino atual existe uma fraca abordagem educacional baseada na experiência, não preparando adequadamente os futuros profissionais. Deste modo a L.F.

pode ser a solução para essa lacuna, pois esta pode ser definida como uma réplica perfeita de processos ou atividades com valor acrescentado na indústria onde os formandos adquirem formação de um modo formal e informal (Baena et al., 2017).

1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal apresentar uma proposta de implementação de uma *Learning Factory* na Universidade da Beira Interior. Sabendo que a indústria atualmente atravessa uma revolução com a introdução de novas tecnologias disruptivas e visto que uma L.F. tem como condição *sine qua non* ter um processo ou um serviço associado, o objetivo secundário será entender de que forma os conceitos da Indústria 4.0 podem ser integrados na L.F. de modo a potencializar a experiência de ensino.

1.3 Metodologia

A presente dissertação foi elaborada utilizando o método científico com uma abordagem indutiva onde, através de procedimentos como a pesquisa bibliográfica e a pesquisa documental sobre temáticas como a Indústria 4.0, as *Learning factories* e a prototipagem rápida, foi possível retirar dados particulares já publicados de modo a poder-se inferir uma análise através de uma abordagem qualitativa, qual é a importância da implementação de uma *Learning factory* na Universidade da Beira Interior (U.B.I.). Para que fosse possível executar este trabalho foram consultados artigos científicos, livros, relatórios governamentais e regulamentos, documentos de sites corporativos (*white documents*), através de bases de dados como a ScienceDirect, a Web of Science e a IEEE Xplore.

1.4 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em seis capítulos, onde no primeiro é realizada uma introdução à temática através da sua contextualização e apresentação dos objetivos, da metodologia e da estrutura do trabalho. A revisão bibliográfica das temáticas base do trabalho ocorre nos capítulos seguintes, onde primeiramente é realizado um enquadramento à Indústria 4.0, apresentando a sua definição e as características, as tecnologias e as aplicações que lhe são associadas. No terceiro capítulo é realizada uma contextualização histórica ao tema das *Learning Factories* e as diferentes definições do tema, sendo posteriormente apresentada a mais consensual. Neste capítulo são ainda exibidos diferentes exemplos de L.F. em todo mundo. De modo a sustentar a escolha do

serviço base para L.F. a implementar na Universidade da Beira Interior é realizada uma revisão bibliográfica ao tema da prototipagem rápida onde são apresentados os principais processos de produção aditiva. Concluída a revisão bibliográfica é apresentada a proposta de criação de uma *Learning Factory* na universidade, onde primeiramente são descritos o FabLab e os seus equipamentos como potencial espaço para implementação desta e posteriormente são propostas modificações no layout e investimentos. Neste capítulo também é apresentada uma possível estrutura organizacional. Para finalizar, são apresentadas as conclusões extraídas com a realização deste trabalho após a revisão bibliográfica das temáticas bases e da proposta de implementação.

2. Indústria 4.0

Neste capítulo será apresentada a evolução história da Indústria, as motivações para a implementação da Indústria 4.0 e a sua definição, assim como as suas características, aplicações e tecnologias, terminando o capítulo expondo o impacto da quarta revolução industrial.

2.1 Evolução Histórica da Indústria

A nível mundial, os avanços nas ciências e nas tecnologias permitiram, de forma contínua, o desenvolvimento da industrialização (Belvedere, Grando & Bielli, 2013). Apesar de não existir um consenso mútuo no que constitui uma revolução industrial, é comum identificar quatro estados evolutivos na perspetiva tecnológica (shafi, Deschamps, Loures & Ramos, 2017).

No final do século XVIII, na Inglaterra ocorreu a 1ª revolução industrial com a introdução da mecanização através do motor a vapor. No início do século XX surgiu a 2ª revolução com a produção em massa através do desenvolvimento das linhas de produção e da energia elétrica. Na década de 70 a produção começou a ser automatizada apoiada na eletrónica e nas tecnologias de informação (TI), dando-se assim, a 3ª revolução industrial (Lukač, 2015).

De uma forma geral, é perceptível que a necessidade do aumento da produtividade e eficiência é a razão central de todas as três revoluções industriais, que apenas foi possível pelos desenvolvimentos tecnológicos disruptivos como o motor a vapor, a eletricidade e a tecnologia digital (Schuh, Potente, Hauptvogel & Potente, 2013).

Ao longo dos últimos anos, o trinómio constituído por indústrias, investigadores e decisores políticos têm anunciado que uma quarta revolução industrial está em desenvolvimento (Thoben, Wiesner & Wuest, 2017). A Indústria 4.0 (I 4.0) é um conceito que recentemente tem sido discutido e pesquisado, podendo eventualmente representar a quarta revolução industrial, sendo generalizadamente caracterizada pela introdução dos Sistemas Ciber-Físicos (Ciber Physical Systems - CPS) e da Internet das Coisas na fabricação (Weyer, Schmitt, Ohmer & Gorecky, 2015). Conforme se pode denotar, na figura seguinte, a velocidade das revoluções industriais tem aumentado assim como o nível de complexidade tecnológico.

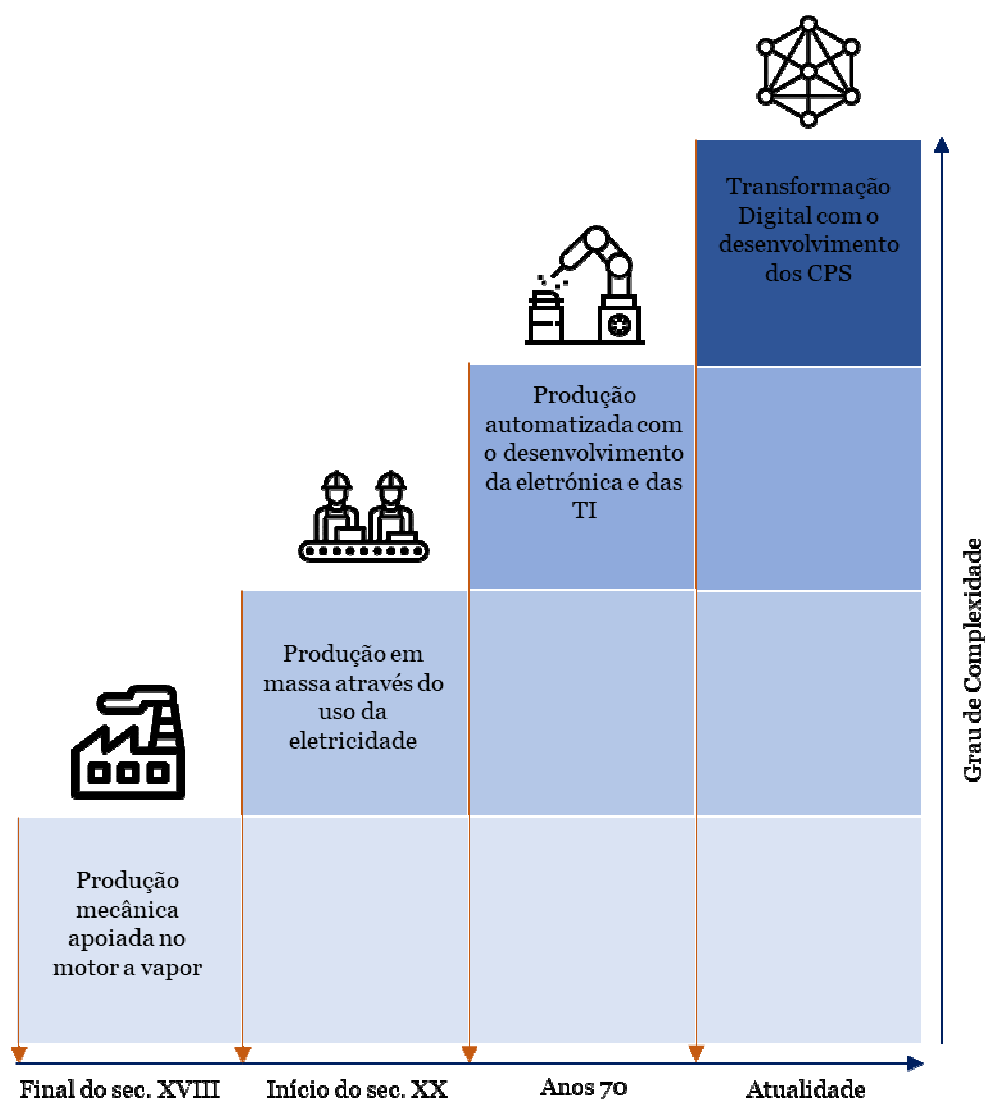


Figura 1 – As 4 revoluções industriais
 Fonte: Adaptado de Delloite, 2015

2.2 Motivações para a 4ª Revolução Industrial

Ao longo dos últimos 30 anos os Estados Unidos da América (E.U.A.) sofreram um processo de desindustrialização, onde deslocaram a produção para países como o México e a China ficando apenas com fábricas de produção de conhecimento. Entretanto, retornam neste momento à industrialização motivados pela revolução energética americana do gás de xisto que trouxe competitividade a nível dos preços do gás natural e da energia elétrica. A Alemanha que tem um sector industrial bastante competitivo a nível mundial não passou pelo processo de reindustrialização, porém criou o conceito de Indústria 4.0 para fazer um *up-grade* à sua indústria e para oferecer ao mundo um conjunto de tecnologias digitais que apoiam a 4ª revolução industrial. Os restantes países da Europa, onde se inclui Portugal, que deslocalizaram a sua produção para países com mão-de-obra mais barata, pretendem voltar à industrialização como forma de revitalizarem as suas

economias, mas para um novo tipo de indústria (Confederação Empresarial de Portugal - CIP, 2017).

Através de pesquisas foi demonstrado que a lei de Moore também pode ser aplicada nos desenvolvimentos tecnológicos, esta demonstra que a capacidade dos *microchips*, largura de banda e computadores é duplicada a cada 18 meses. Tecnologias como as impressoras 3D, a inteligência artificial, a robótica, a nanotecnologia, são alguns dos exemplos do desenvolvimento tecnológico a um ritmo exponencial que estão a mudar radicalmente os processos industriais e que caracterizam este novo tipo de indústria (Delloite,2015).

O mundo ocidental interessou-se novamente pela indústria e utiliza como motor as tecnologias disruptivas, como as tecnologias digitais, usufruindo ao máximo das tecnologias de informação, comunicação e localização (TICLs), da robótica avançada para apoiar a produção de ponta-a-ponta que é baseada nas informações dos clientes, onde os produtos finais são personalizados e em lotes pequenos sem custos adicionais (CIP,2017).

2.3 Estratégias Para Alcançar a 4ª Revolução Industrial

A nível mundial os governos e as indústrias denotaram que existia uma crescente tendência para ocorrer a 4ª revolução industrial e para que não perdessem a linha da frente tomaram a iniciativa através das seguintes estratégias (Liao et al, 2017):

- Desde 2011, que o governo dos E.U.A. iniciou um conjunto de discussões, ações e recomendações a nível nacional para assegurar que o país liderasse a nova geração da fabricação, estas foram intituladas de *Advanced Manufacturing Partnership* (AMP);
- Em 2012, foi apresentado pela Alemanha um plano de ação denominado de *High-Tech Strategy 2020*, com verbas na ordem dos milhares de milhões de euros por ano, para desenvolver tecnologias de topo. A Indústria 4.0 é um dos 10 projetos de futuro englobados nesta iniciativa;
- No ano de 2013, o governo Francês iniciou uma revisão estratégica com o título de *La Nouvelle France Industrielle*, na qual estão referidas as 34 iniciativas sectoriais da política industrial do país;
- No ano de 2013, foi apresentada uma imagem a longo prazo (até 2050) para o setor de produção do Reino Unido denominado *The Future of Manufacturing*. Esta servirá para calibrar a política de suporte ao crescimento da produção do país;
- Em 2014, a Comissão Europeia criou uma parceria público-privada chamada de *Factories of the Future* (FoF). Esta iniciativa está contemplada no programa Horizonte 2020;

- No ano de 2014, o governo Sul Coreano lançou o programa *Innovation in Manufacturing 3.0* de modo a impulsionar novas estratégias para uma nova fase da produção do país.
- Desde 2014 existe um consórcio fundado pelas empresas AT&T, Cisco, General Electric, IBM e Intel denominado *Industrial Internet Consortium* (IIC) com o objetivo de potencializar e coordenar as prioridades e as tecnologias que permitem a *Industrial Internet*;
- Em 2015, a China lançou o programa *Made in China 2025* conjuntamente com a estratégia Internet +, onde são definidos os 10 campos prioritários para o setor de produção com o intuito de acelerar a informatização e industrialização da China;
- Em 2015, o governo Japonês adotou as iniciativas *5th Science and Technology Basic Plan* viradas para o setor da fabricação para realizar o seu projeto líder *Super Smart Society*;
- No ano de 2016, Singapura disponibilizou uma verba de 19 milhares de milhões de dólares para o plano RIE 2020 (*Research, Innovation and Enterprise*);

Verifica-se uma grande diferença entre esta revolução industrial e as precedentes, visto que a 4ª revolução industrial é caracterizada antes do seu desenvolvimento total e não constatada posteriormente (Hermann, Pentek & Otto, 2016). Pode-se indicar que esta revolução está a ser prevista e as diversas iniciativas apresentadas acima são a prova disso.

2.4 Definição de Indústria 4.0

O conceito de Indústria 4.0 apareceu pela primeira vez num artigo publicado pelo governo Alemão em novembro de 2011 fazendo parte da *High-Tech Strategy 2020* (Zhou, Liu & Zhou, 2015).

Esta iniciativa Alemã partiu do Ministério da Educação e Pesquisa e do Ministério dos Assuntos Económicos e da Energia com intuito de estimular uma produção digital, aumentando a digitalização e a interconexão de produtos, cadeias de valor e modelos comerciais. Outros dos objetivos passam por apoiar a investigação, a criação de uma rede de parceiros industriais e a padronização. O prazo previsto para implementação é de 10 a 15 anos, onde as partes interessadas consideram que é uma estratégia essencial para consolidar a Alemanha como líder tecnológico na engenharia mecânica. A estratégia da I 4.0 visa garantir uma indústria alemã ajustada ao futuro da fabricação, apoiando a integração dos Sistemas Ciber-Físicos e da Internet das Coisas e dos Serviços (*Internet of Services* - IoS) para aumentar a eficiência e flexibilidade dos processos produtivos perspetivando o crescimento económico. De acordo com a chanceler Alemã, Angela

Merkel, o país “deve lidar rapidamente com a fusão do mundo online com o mundo da produção industrial. Na Alemanha nós chamamos de *Industrie 4.0*” (Comissão Europeia, 2017).

Apesar do interesse despertado pela Indústria 4.0 a nível mundial, não existe formalmente uma definição para este conceito, podendo variar (Mrugalska & Wyrwicka, 2017) e adoptar as seguintes definições:

- “Um novo nível de organização e gestão da cadeia de valor ao longo do ciclo-de-vida dos produtos” (Kagermann, Wolfgang & Helbig, 2013);
- “Integração de máquinas e dispositivos físicos complexos com sensores e software em rede, usados para prever, controlar e planear melhor os resultados comerciais e sociais” (The Industrial Internet Consortium, 2014);
- “Refere-se a uma nova etapa de desenvolvimento na organização e gestão de todo o processo da cadeia de valor envolvido na indústria de fabricação” (Delloite, 2015);
- “Um termo coletivo para tecnologias e conceitos de organização da cadeia de valor” (Hermann, et al., 2016);
- “Em tempo real, redes inteligentes e digitais de pessoas, equipamentos e objetos para gerirem processos de negócios e redes de criação de valor” (Dombrowski, Richter & Krenkel, 2017);
- “Representa a transição do sector industrial para o modelo de unidade produtiva digitalmente integrada” (Confederação Empresarial de Portugal (CIP),2017);

2.5 Características da Indústria 4.0

Nos últimos anos, o panorama industrial sofreu diversas mudanças devido a desenvolvimentos disruptivos no campo das tecnologias digitais e da produção, anunciando a quarta revolução industrial, várias vezes referida como Indústria 4.0 (Zhou, et al.,2015).

Neste conceito, temos a junção do mundo físico e do mundo digital através dos sistemas Ciber-Físicos, que permite a troca de dados constantes durante o processo de fabricação, ocorre a digitalização dos processos de produção, sendo que esta troca pode ser entre produtos e máquinas ou até entre diferentes figuras das cadeias de abastecimentos. Outra tecnologia importante a desenvolver é a Internet das Coisas, pois é esta que permite a conexão entre as máquinas e os objetos, através de sensores (CIP,2017). Com a integração da IoT e dos CPS na produção surge o conceito *Smart Factory* que é um dos componentes chave da Indústria 4.0, e é definido como uma fábrica que apoia pessoas e máquinas na

execução dos seus trabalhos através dos *inputs* constantes que recebe (Hermann, et al., 2016).

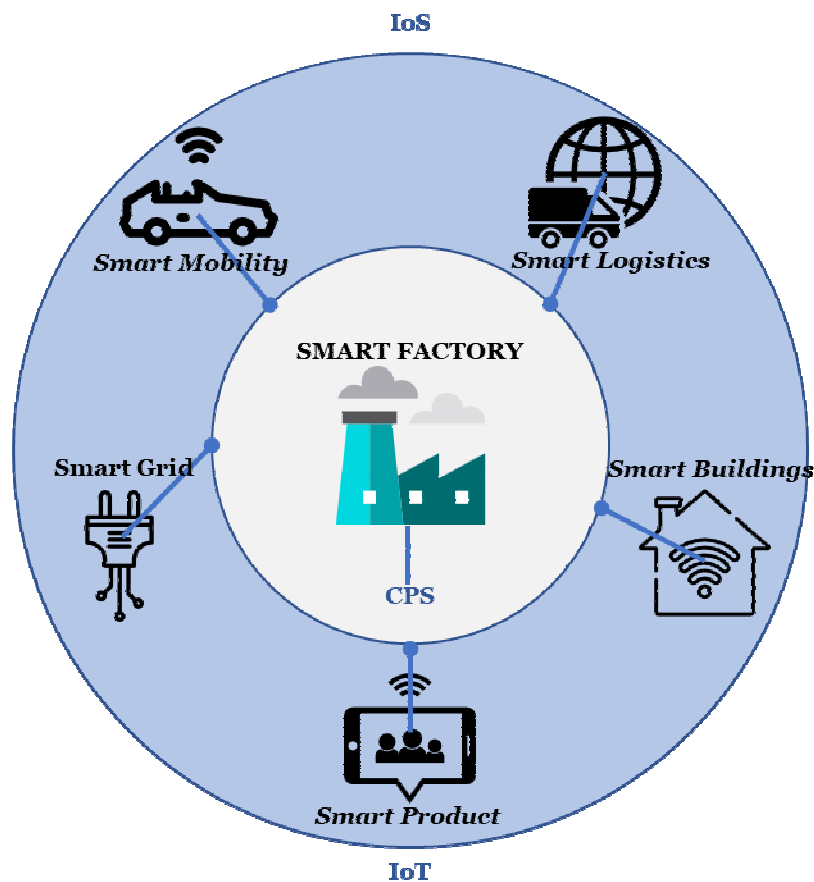


Figura 2 – Interligação dos componentes da Indústria 4.0
Fonte: Adaptado de Shafiq, Sanin, Szczerbicki & Toro, 2015

Através dos componentes da Indústria 4.0, acima mencionados, podem ser indicados seis princípios de design (Shafiq, Sanin, Szczerbicki & Toro, 2015):

- Interoperabilidade – Capacidade de que os componentes físicos, humanos e as *smart Factories* têm de comunicar entre si;
- Virtualização – Cópia virtual dos objetos físicos;
- Descentralização – Capacidade de os componentes tomarem as próprias decisões;
- Resposta em Tempo Real – Capacidade de reunir e analisar dados em tempo real;
- Orientação para Serviço – Habilidade de reunir e analisar dados em tempo real;
- Modularização – Capacidade das *Smart Factories* mudarem requisitos através da substituição e expansão de módulos.

Os princípios acima mencionados podem ser implementados através de uma estratégia com duas abordagens diferentes, a primeira é através da adaptação das tecnologias e experiências existentes aos novos requisitos tecnológicos de produção. A segunda, através

da pesquisa e desenvolvimento de novas soluções para alcançar novos locais de produção e novos mercados. No seguimento do mencionado é necessário focar em três características (Shafiq, et al.,2015):

- Integração Horizontal: refere-se à capacidade das novas tecnologias permitirem uma gestão e troca de informações entre os diferentes agentes do processo produtivo;
- Integração Vertical: refere-se à integração nos vários níveis hierárquicos de vários sistemas de tecnologias de informação permitindo deste modo criar um sistema flexível e reajustável.
- Integração Ponta-a-Ponta: tem como objetivo eliminar as falhas entre a fase de design, a fabricação e o cliente.

Na perspetiva de Shafiq, et al. (2015), os principais objetivos da Indústria 4.0 passam por:

- Tecnologias de informação que permitam a produção em massa de produtos customizados;
- Adaptações automáticas e flexíveis à cadeia de produção;
- Rastreamento e autoconsciências de partes e produtos e permitir a sua comunicação com outros produtos ou máquinas;
- Melhorar os paradigmas de relação entre humanos e máquinas (Human Machine Interface -HMI);
- Otimização da produção através da comunicação permitida pela IoT, nas fábricas inteligentes;
- Novos modelos radicais de negócio e serviços trazendo mudanças nas interações da cadeia de valor;

O conceito da Indústria 4.0 é constituído por um mosaico tecnológico, com o objetivo final de ter impacto no produto, processo e modelo de negócio de modo a mudar a relação com o cliente. Ao nível das tecnologias podemos mencionar algumas destas: *Big Data*, Análise de Dados Avançada, Robotização, Nanotecnologias e Fotónica, Simulação 3D de produtos, materiais ou processos durante a cadeia de produção, Sistemas Digitais de Integração horizontal e vertical, IoT, CPS, Cibersegurança, Processos em *Cloud*, Produção Aditiva e Impressoras 3D, Inteligência Artificial e Máquinas Cognitivas e Interfaces inteligentes com o recurso à Psicometria (CIP, 2017).

2.6 Tecnologias Chave da Indústria 4.0

As duas tecnologias chave associadas ao conceito da Indústria 4.0 são os Sistemas Ciber-Físicos e a Internet das Coisas, deste modo nesta secção estas são apresentadas em detalhe.

2.6.1. CPS (*Cyber Physical Systems*) – Sistemas Ciber-Físicos

De uma forma genérica, os sistemas ciber-físicos, são utilizados para definir a I 4.0, sendo estes um desenvolvimento bastante significativo no campo das ciências da computação e das tecnologias da informação. Podem ser definidos como sistemas computacionais colaborativos que estão em conexão com o mundo físico e os seus processos em andamento, utilizando e fornecendo, simultaneamente, serviços de acesso e processamento de dados disponíveis na Internet (Monostori et al., 2016).

Shafiq et al. (2015) definem, os sistemas ciber-físicos, como a convergência de dois mundos, o físico e digital, com a criação de redes globais de negócio onde estão incorporadas as suas unidades produtivas, máquinas e armazenamento. Por outras palavras, a tecnologia que permite a gestão de sistemas interligados através da integração do ambiente físico e computacional é definida como sistema ciber-físico (Lee, Bagheri & Kao, 2015).

A informação e os dados são transferidos entre terminais de computador, *clouds* e aplicações wireless interligadas entre si através dos CPS que podem ser considerados microcontroladores que gerem sensores e atuadores. As tarefas associadas à produção, como o planeamento, a análise, o design e a manutenção serão ajudadas por estes sistemas pois os CPS combinam informações e materiais, descentralização e autonomia, permitindo um aumento da performance das indústrias (Ivanov, Sokolov & Ivanova, 2016).

Para que o conceito de Indústria 4.0 seja integrado na produção é necessário a implementação industrial dos CPS, que neste caso passaram a ser designados por sistemas de produção ciber físicos (CPPS). A integração destes sistemas com a produção, a logística e os serviços trará uma transformação industrial, onde os CPS terão um papel fundamental visto que estes permitirão a ligação das diversas camadas da produção e a conexão entre elementos autónomos, como por exemplo as máquinas inteligentes e subsistemas como as fábricas inteligentes (Francalanza, Borga & Constantinescu 2017).

Existe um desafio para os investigadores assim como para as indústrias que passa por saber como implementar, melhorar e tornar fiáveis os CPS. Deste modo, Monostori et al. (2016), indica que tanto os CPS e os CPPS serão implementados e alavancados através do desenvolvimento de procedimentos de tratamentos de dados, das tecnologias de informação e computação e do desenvolvimento da automação de produção. Sublinha ainda que os CPPS vão dominar os sistemas de produção trazendo uma nova geração de indústria.

2.6.2. A Internet das Coisas (IoT) e a Internet dos Serviços (IoS)

A Internet das Coisas (IoT), tal como os CPS, é considerada como um dos principais *drivers* da Indústria 4.0 e pode ser definida de acordo com diferentes visões. A ligação à internet de objetos físicos presentes no chão de uma fábrica, pessoas e sistemas de TI pode ser definido como a IoT, sendo que o resultado deste tipo de conexão é referido como fábrica inteligente (Shariatzadeh, Lundho, Lindberg, & Sivard, 2016). Outra das múltiplas definições existentes para a IoT é que esta é um mundo no qual os objetos físicos estão integrados na rede de informações e são ativos participantes nos negócios, onde existem serviços destinados a interagir com estes através da Internet, permitindo consultar quaisquer tipos de dados ligados a estes objetos físicos e inteligentes (Haller, Karnouskos & Schroth, 2008).

A IoT é um sistema complexo como os CPS sendo que frequentemente é indicado que a ligação dos CPS à Internet pode ser denominada de Internet das Coisas (Jazdi, 2014). A IoT integra na sua composição vários equipamentos com capacidade de deteção, identificação, processamento, comunicação e funcionamento em rede (Xu, 2016). Um sistema IoT, que é constituído pelo binómio rede wireless industrial (IWN) e a IoT, pode providenciar aos clientes produtos personalizados e específicos. Os utilizadores através de uma página de internet inserem as suas customizações e através dos servidores da internet os dados vão chegar às *clouds* industriais, onde o produtor vai integrar toda esta informação no produto, tornando todo o processo produtivo mais eficiente (Roblek, Meško & Krapež, 2016).

Através da conexão entre humanos e máquinas proporcionada pela IoT, existe uma transferência e integração de conhecimento entre e dentro das organizações, onde a IoT proporciona de uma forma mais eficiente o desenvolvimento e a gestão de conhecimento. Conforme se pode verificar no paragrafo anterior, a relação entre os clientes, os produtores e os fornecedores irá mudar através da Indústria 4.0 e da IoT, onde as decisões de produção deixarão de ser tomadas unicamente por quem produz ou vende, mas

também pelo cliente, estando este mais envolvido nas decisões sobre a qualidade e a customização de produtos. Este tipo de evolução cria também necessidades de melhorar a ciber-segurança devido aos processos complexos existentes nesta relação homem-máquina. (Thames & Schaefer, 2016).

Existe outro conceito similar à IoT que é a Internet dos Serviços a diferença entre o primeiro e o segundo é que em vez de ser aplicado a entidades físicas é aplicado à prestação de serviços. A IoS emergiu mais recentemente e vem trazer um novo modelo de negócio, mudando profundamente o modo como os serviços são fornecidos, trazendo novas oportunidades para a indústria de serviços estabelecendo bases comerciais e técnicas na criação de novas redes comerciais entre clientes e prestadores de serviços (Cardoso, Voigt & Winkler, 2008).

A aplicação da IoT na indústria também pode ser designada por Internet Industrial das Coisas (IIoT) e esta trará várias oportunidades para as empresas, fabricantes e utilizadores, com importantes impactos em diversas áreas como a logísticas, produção, automação, gestão de processos e transportes, etc. (Atzori, Iera & Morabito, 2010).

De uma forma geral, o desenvolvimento da IoT e os seus conceitos relacionados permitirão que os objetos, serviços e processos se tornem mais inteligentes, fiáveis e autónomos, contribuindo para aumentar o valor acrescentado dos produtos e serviços (Kyriazis & Varvarigou, 2013).

2.7 Aplicações da Indústria 4.0

O conceito da Indústria 4.0 permitirá o desenvolvimento de novas aplicações, tais como as fábricas e os produtos inteligentes que podem ser analisados nas seguintes subsecções.

2.7.1. Fábricas Inteligentes

Uma das principais inovações resultantes da Indústria 4.0 são as fábricas inteligentes, que são o resultado de diversos desenvolvimentos na estrutura das fábricas nas quais ocorreu a integração, digitalização e utilização de estruturas mais flexíveis e inteligentes. Este tipo de transformações permitiram uma evolução ao longo de toda a cadeia de valor, tornando-se esta mais inteligente com processos mais flexíveis e adaptativos (Hajrizi, 2016).

As fábricas resultantes da Indústria 4.0 são mais inteligentes, flexíveis e dinâmicas, existindo nas mesmas uma nova forma de comunicação em tempo real, integrada, entre os recursos da fábrica (sensores, atuadores, transportadores, máquinas e robôs), onde as

máquinas e os equipamentos atingirão um nível de automação e auto-otimização, que permite aos processos de produção terem a capacidade de cumprir as exigências do mercado nos quais são exigidos *standards* mais complexos para os produtos (Roblek et al., 2016).

As fábricas inteligentes incorporam várias das tecnologias-chave da Indústria 4.0, tais como os CPS, a IoT, o *Big Data*, a *Cloud Computing*, entre outras, de modo a permitirem uma visão orientada para a recolha de dados e ligada à cadeia de abastecimento (Fedorov et al., 2015).

Um dos aspetos interessantes das fábricas inteligentes e da produção inteligente associada é o papel dado ao ser humano nesta estrutura, no qual este não é simplesmente substituído por inteligência artificial e automação, como outras iniciativas indicavam no passado, mas deve existir uma melhoria das suas capacidades (Thoben et al., 2017).

Apesar de existir um amplo e abrangente âmbito no que se refere às fábricas inteligentes, pode-se mesmo assim indicar que os seus três principais objetivos são os seguintes:

- Cadeias de abastecimento mais flexíveis;
- Produção sustentável;
- Otimização da fábrica.

2.7.2. Produto Inteligente

Na Indústria 4.0, através do apoio de sensores e microchips, os produtos são considerados inteligentes. Durante o seu próprio processo produtivo, estes têm a capacidade de se auto monitorizar, armazenando dados, podendo requisitar recursos e autocontrolar os seus processos produtivos. Deste modo, os produtos representam uma parte ativa ao longo de toda a cadeia de valor. Posteriormente, durante a sua vida útil, como produtos finais, existe uma constante transmissão de dados feita ao fabricante, sobre o seu estado ao longo do seu ciclo-de-vida, (Kagermann, Wolfgang & Helbig, 2013).

Os produtos inteligentes, representando aplicações resultantes da indústria 4.0, a sua criação será feita com o apoio de alta tecnologia digital e física entrelaçadas (CPS), onde *drivers* tais como o *Big Data*, a computação em nuvem, a customização em massa e a IoT terão um papel importante para o desenvolvimento destes produtos (Schmidt et al., 2015).

Uma característica chave que faz parte dos produtos inteligentes é a capacidade de interagirem com o ambiente que os rodeia, sendo que através do armazenamento de dados

e da capacidade computacional estes poderão fornecer inputs constantes, quer à produção, quer à manutenção, refinando constantemente o ciclo-de-vida (Schmidt et al., 2015).

2.8 Impacto da Indústria 4.0

Conforme referido nos capítulos anteriores a Indústria 4.0 trará mudanças significativas, quer ao nível dos produtos, quer ao nível da produção, de uma forma vertical, horizontal e de ponta-a-ponta, sendo que este tipo de mudança trará novos modelos de negócio que por sua vez afetarão a indústria e os mercados, melhorando os processos e a competitividade das empresas. Este novo paradigma, que é a I 4.0, trará mudanças para indústria e não só, deste modo pode-se categorizar estas mudanças em 6 setores (Pereira & Romero, 2017):

- **Indústria:** é o sector mais visado pela indústria 4.0, onde existe uma nova visão quanto à produção, onde esta será descentralizada e digitalizada, com produtos inteligentes autoconscientes com capacidade de se adaptarem ao ambiente em seu redor. A I 4.0 trará também uma passagem da produção em massa para uma customização em massa, aumentando a complexidade, trazendo a necessidade de um maior desenvolvimento tecnológico para alcançar este objetivo. Este novo paradigma irá para além da produtividade, afetar toda a cadeia de abastecimento, de ponta-a-ponta, desde o design até à distribuição do produto;
- **Produtos e Serviços:** no seguimento das mudanças económicas, os mercados mudaram ficando mais dinâmicos, trazendo um aumento na complexidade e diversidade dos produtos, promovendo deste modo a introdução a customização em massa. A I 4.0 introduz novos produtos e serviços, os quais estão em comunicação em tempo real, durante todo o seu ciclo-de-vida com o intuito de se otimizarem a si próprios e à cadeia de valor.
- **Mercados e Modelos de Negócio:** as novas tecnologias associadas à Indústria 4.0 vieram revolucionar os negócios tradicionais, na forma como os produtos e serviços são vendidos e fornecidos, trazendo novas oportunidades e modelos de negócio. A I 4.0 promove uma interação entre clientes e produtores mais próxima, dando às cadeias de valor uma maior capacidade de resposta, mais adaptadas às exigências do mercado. A digitalização na produção criará modelos de mercado mais complexos, que por sua vez contribuirá para o aumento da competitividade à medida que se eliminam as barreiras entre as estruturas físicas e a informação.

- **Economia:** a fusão do mundo físico com o digital aumentará a inovação tecnológica, que por sua vez aumentará a produtividade e a competitividade das empresas impactando a economia mundial;
- **Ambiente de Trabalho:** os avanços tecnológicos provenientes da Indústria 4.0 estão a transformar os empregos e os seus requisitos, principalmente no que se refere à relação máquina-homem, devido ao trabalho colaborativo que existe neste binómio. Com o aumento de robots e máquinas inteligentes, existirá uma confluência entre o mundo físico e digital onde as interações entre os humanos e as máquinas vão aumentando, assim como as máquinas entre si através da IoT e a IoS promovido pelos CPS. Devido a todas estas mudanças, deverá haver um foco especial nos trabalhadores de modo a não se caminhar para o desemprego tecnológico, mas sim para redefinição dos trabalhos atuais.
- **Desenvolvimento de Capacidades:** as novas capacidades que se têm desenvolvido com as alterações tecnológicas, trarão mudanças na sociedade que são a chave para implementação da Indústria 4.0. O novo contexto laboral necessita de novas competências, sendo que será necessário criar oportunidades para aquisição destas capacidades, assim como assegurar que serão criados novos empregos numa quantidade superior aos que vão desaparecer. Estas novas competências requeridas, deverão ser introduzidas nas escolas, promovendo um pensamento interdisciplinar e desenvolvendo as capacidades e técnicas dos alunos. Uma destas apostas é nas STEM, que é um acrónimo em inglês usado para designar as quatro áreas científicas: Ciências, Tecnologia, Engenharia e Matemática (em inglês Science, Technology, Engineering, and Mathematics), sendo que no contexto educacional é uma ideologia de as interligar, incentivando uma aprendizagem interdisciplinar e prática. No ensino deverá haver uma consciencialização dos alunos para as novas tendências e oportunidades de negócio que a Indústria 4.0 trará.

3. *Learning Factories*

O presente capítulo apresenta a revisão bibliográfica a um dos temas basilares da presente dissertação, as *Learning Factories*, dando a conhecer o seu contexto histórico, a sua definição, tal como as morfologias e tipologias existentes, podendo ainda ser verificado o processo de análise e configuração de uma *Learning Factory* assim como relação entre esta temática e Indústria 4.0. Este capítulo também dá a conhecer diferentes exemplos de *Learning Factories* existentes a nível mundial e a relação entre ensino e a indústria em Portugal.

3.1 A Importância do Ensino

Estudos demonstram que existe uma relação entre a qualidade educacional e o desenvolvimento económico, onde o incremento de um ano de escolaridade na população, representa um acréscimo de 0,58% na economia a longo prazo e que a falta de capacidades tem um efeito negativo na inovação, reconhecendo-se que o capital humano é a chave para o desenvolvimento (Hanushek & Woessmann, 2007).

Estudos previsionais indicam também que irá ocorrer uma mudança no perfil dos trabalhadores, onde os trabalhos necessitarão de mais conhecimentos e habilidades, tornando-se necessário uma maior quantidade de trabalhadores qualificados e existirão mesmo lacunas de recursos humanos para desempenharem funções em certas áreas (CEDEFOP, 2010).

A indústria é um dos maiores geradores de riqueza, sendo que na Europa representa cerca de 21% do produto interno bruto (PIB) de um país. Conforme referido anteriormente, existem inúmeras estratégias a nível governamental e organizacional para se alcançar a 4^a revolução industrial, onde se promove a excelência na produção, associada a novas tecnologias e técnicas. Deste modo será necessário que tanto os operadores como o corpo técnico utilizem métodos de aprendizagem que permitam adquirir as ferramentas necessárias para acompanharem esta revolução (Jovane, Westkämpe & Williams, 2009).

Esta revolução contribuirá para a criação da geração dos “funcionários do conhecimento”, onde a formação será um dos fatores-chave. Porém atualmente a formação não tem acompanhado os avanços tecnológicos ao mesmo ritmo que eles ocorrem, existindo um défice em fornecer ao mercado de trabalho recursos humanos com formação adequada às exigências atuais, estando comprovado que os métodos tradicionais de ensino se apresentam ineficientes para que os alunos e futura mão-de-obra de trabalho

desenvolvam as competências exigidas na indústria produtiva atual e futura (Cachay, Wennemer, Abele & Tenberg, 2012)

Existe uma necessidade de utilizar modelos mais modernos no processo de formação industrial para acompanhar os desafios emergentes, tornando-se premente uma revisão do paradigma educacional atual, pois apenas assim se poderá melhorar a performance industrial das empresas. Na utilização destes novos modelos de ensino é necessário criar uma relação adequada entre o ensino e a indústria, tendo em conta que a formação industrial não pode ser dada apenas numa sala de aulas e que esta apenas pode evoluir utilizando os “inputs” provenientes da investigação (Chryssolouris, Mavrikios & Mourtzis, 2013)

Um dos desafios que as universidades e os locais de formação industrial atravessam hoje em dia é a dificuldade em identificar as competências e o tipo de perfil que os formandos devem ter, pois só assim poderão aperfeiçoar os conceitos lecionados e o modo de ensino. Uma das formas de se enfrentar este desafio é com a criação de um ambiente de aprendizagem multidisciplinar e inovador, onde as *Learning Factories* são reconhecidas como uma eficiente abordagem para enfrentar estes desafios, devido à relação próxima entre ensino e indústria que se estabelece nesta abordagem (Abele et al., 2015)

3.2 Contexto Histórico

O termo *Learning Factory* foi pela primeira vez apresentado e patenteado, em 1994, aquando a National Science Foundation (NSF) concedeu um apoio para desenvolver projetos de conceção com interligação à indústria, a um consórcio liderado pela Universidade de Penn State. Desde então, esta universidade com infraestrutura com 2000 m² e com o apoio de diversas máquinas, materiais e ferramentas, desenvolveu mais de 1800 projetos com o apoio de mais de 500 patrocinadores (Jorgensen et al., 1995).

Apesar do termo *Learning Factory* ter surgido em 1994, no final dos anos 80 apareceu na Alemanha o termo *Lernfabrik*, o equivalente ao termo anglo-saxónico em estudo, num programa de qualificação associado ao CIM (Computer-integrated manufacturing) que é uma abordagem que utiliza computadores para controlar todo o processo produtivo (Reith, 1988)

O conceito *Teaching Factory* ganhou relevância no início dos anos 2000, especialmente nos Estados Unidos, sendo a sua origem nas ciências médicas, especificamente nos hospitais universitários que permitiam os alunos aprenderem em ambiente real. Foi

transposto o conceito para indústria, onde consiste na formação dos educandos em ambiente real (Alptekin, Pouraghabagher, McQuaid & Waldorf, 2001).

A implementação de *Learning Factories* tem aumentado bastante ao longo da última década, especialmente na Europa, com diversas variantes, mas sempre com o objetivo principal de melhorar a experiência de ensino, sendo que o Institute of Production Management, Technology and Machine Tools da Universidade de Darmstadt, criado em 2007, foi uma das primeiras iniciativas da era mais recente das *Learning Factories* (Abele et al., 2015).

No ano de 2011 foi estabelecida a iniciativa das *Learning Factories* Europeias aquando a primeira conferência das L.F. em Darmstadt. Em 2014, foi estabelecido um grupo de trabalho colaborativo (CWG – *Collaborative Working-Group*) internamente na CIRP (*Collège International pour la Recherche en Productique*), com intuito principal de organizar a pesquisa relativamente às *Learning Factories*, de forma a compreender os temas associados, recolher conhecimento relativamente ao estado da arte e fortalecer a ligação entre a indústria e as universidades neste tema (Abele, Bechtloff, Cachay & Tenberg, 2012).

Conforme se pode verificar na figura abaixo, a quantidade de artigos no Google Scholar associados aos termos *Learning Factories*, *Teaching Factory* ou *Lernfabrik* tem crescido exponencialmente, percebendo-se assim uma tendência de crescimento por esta temática (Tisch & Metternich, 2017).

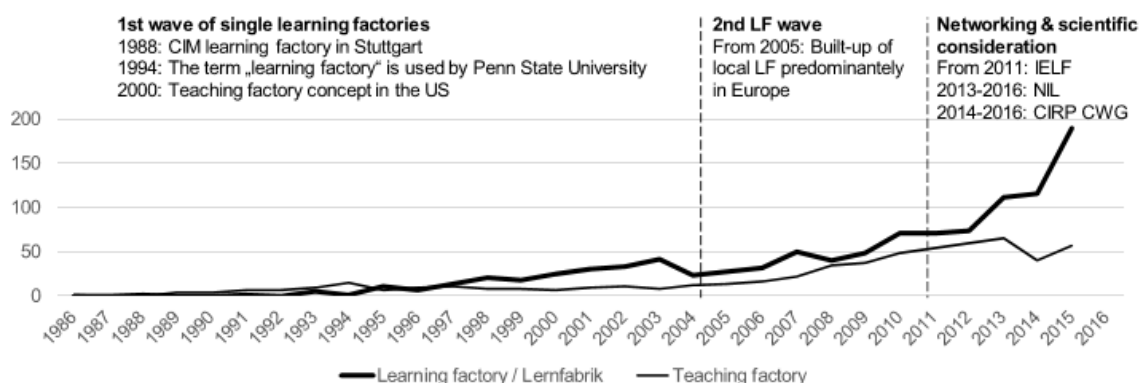


Figura 3 – Evolução temporal de artigos ligados aos termos Learning Factory / Lernfabrik e Teaching factory no Google Scholar
Fonte: Tisch & Metternich, 2017

3.3 Morfologias e Tipologias das *Learning Factories*

O número de artigos associados à temática em estudo tem crescido ao longo do tempo, no mesmo sentido foram publicados diversos modelos para categorizar e descrever as *Learning Factories* (Wagner, AlGeddawy, ElMaraghy & Müller 2012)

Essencialmente, os modelos utilizam uma abordagem simplista na análise morfológica, com uma cobertura bastante fraca no que concerne à dimensão didática, de modo a facilitar a delineação das características chave. A análise morfológica é bastante útil para descrever as *Learning Factories*, visto que são sistemas complexos, deste modo é possível integrar um elevado número de características relevantes assim como potenciais atributos sem comprometer a sua utilidade (Metternich, Abele & Tisch , 2013).

De uma forma geral, através dos modelos existentes, uma descrição holística e genérica das *Learning Factories* é alcançada, enquanto ao mesmo tempo uma instituição em particular pode também ser detalhada, visto que o modelo descritivo tem a capacidade de efetuar uma ilustração simplificada das relações entre a fase conceptual e a realidade de uma L.F. em específico (Tisch, Ranz, Abele, Metternich, & Hummel, 2015a).

Os diferentes modelos de sistematização das L.F. contêm várias características ou características com diferentes atributos, sendo que muitas vezes estes são estruturadas em grupos ou dimensões dadas a sua semelhança. Na tabela abaixo é possível verificar diferentes modelos existentes abordados por diferentes autores assim como o número de dimensões e características que lhes conferem (Tisch et al., 2015a).

Tabela 1 – Modelos de classificação de L.F.

Fonte: Adaptado de Tisch et al., 2015a

Autor	Foco de Morfologia / Tipologia / Classificação	Grupos de características (Dimensões)	Características
Wagner U et al, 2012	Esquema de classificação para a mutabilidade das diferentes Learning Factories	5	N/A
Tisch M et al, 2013 IELF (2012)	Descrição morfológica das principais características das Learning Factories	1	11
Steffen M et al, 2013	Modelo de descrição detalhado das Learning Factories	3	25
Steffen M et al, 2013	Morfologia com foco em aspetos didáticos dentro das Learning Factories	6	40
Tisch M, 2015	Modelo de descrição alargado para as Learning Factories com base nas dimensões definidas pela CIRP para L.F.	7	59

Estes modelos devem ser desenvolvidos e ter uma expansão contínua visto que as novas tecnologias têm um impacto sobre as necessidades de aprendizagem e métodos de ensino desta forma, as *Learning Factories* têm acompanhado estas evoluções (Tisch et al., 2015a).

No sentido de absorver estas mudanças, o CWG da CIRP juntamente com o projeto Network of Innovative Learning Factories (NIL) desenvolveram um modelo descritivo multidimensional com 3 propósitos (Tisch et al., 2015a):

- Delinear as L.F. existentes através de uma ferramenta;
- Orientar e criar as guias para definir e estabelecer uma nova L.F.;
- Padronizar o conceito de L.F.

Este modelo contém 7 dimensões (Anexos 1 a 7), 59 características e os seus respetivos atributos, que do ponto de vista académico é consensual e são os indicados para descreverem uma L.F. (Tisch et al., 2015a).

3.4 Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP

A primeira dimensão é o modelo operacional, no qual se define a natureza da instituição que explora a L.F., o público alvo, o desenvolvimento e o tipo de financiamento, sendo que hoje em dia as *Learning Factories* são maioritariamente exploradas por instituições académicas, empresas de consultoria e grande empresas industriais (Tisch et al., 2015a).

Na segunda dimensão, classificam-se os propósitos divididos em principais, que podem ser educacionais, investigação ou treino vocacional, e os secundários que poderão ser para

a produção industrial, a demonstração e a transferência de tecnologia, propaganda para produção e testes. Também se classificam os alvos das L.F., que poderão ser constituídos por grupos homogêneos ou heterógenos ligados a uma indústria específica (automóvel, aeronáutica, etc.) e indexados a um tipo de pesquisa específica (automação, gestão *Lean*, etc.) (Tisch et al., 2015a).

O processo é a terceira dimensão, onde são definidos os ciclos de vida do produto, fábrica, tecnologia e ordem. São detalhados também os fluxos de material, tipo de processo, organização da produção, nível de automação e métodos de produção e tecnologia (Tisch et al., 2015a).

Outra dimensão é a configuração, na qual é definido o tipo de ambiente de aprendizagem que pode variar entre dois extremos, físico e virtual, sendo que este ambiente pode ter desde o tamanho real a uma redução à escala. Também se define o nível do sistema de trabalho, que poderá ser numa estação, numa fábrica ou numa rede. A flexibilidade e mutabilidade também são duas características definidas devido à possibilidade de serem os formandos a remodelar a própria L.F. A última das características desta dimensão é o suporte de IT existente, que é utilizado na indústria desde o design até à fase pós-produção (Tisch et al., 2015a).

A quinta dimensão é o produto, funcionando como o instrumento funcional de todas as L.F. e permitindo a transferência de conhecimento através das características que lhe são inerentes. A definição do produto para uma *Learning Factory* é premeditada e pode ser um produto já existente no mercado ou um novo a ser desenvolvido em concreto para um objetivo específico. O ciclo-de-vida do produto escolhido pode permitir que este seja reciclado entre formações ou até ter como destino final a venda. A escolha do produto tem um impacto na complexidade do *layout* de aprendizagem assim como na duração da formação, impactando também nos custos operacionais da própria L.F. (Tisch et al., 2015a).

Sendo uma fábrica de ensino, uma das dimensões que tinha de fazer parte da sua classificação é a dimensão didática. Algumas das características que fazem parte desta dimensão são as classes de competência, cenários de ensino, canal de comunicação, grau de autonomia, fundamentos teóricos, etc. Apesar de as L.F. serem orientadas para um ensino mais prático, deve ter-se em atenção que a parte teórica é essencial e que as competências geralmente são desenvolvidas através do ciclo alternante entre a prática e a teoria (Tisch et al., 2015a).

A sétima e última dimensão são as métricas da L.F., na qual é definida a sua área útil, número de aulas standardizadas, duração destas, número de participantes por sessão e por ano, assim como número de investigadores associados em tempo integral à *Learning Factory* (Tisch et al.,2015a).

3.5 Definição de *Learning Factory*

A primeira definição de *Learning Factory* conhecida, proveniente de Jorgensen, Lamancusa, Zayas-Castro & Ratner (1995), define esta como uma instalação que realiza produtos e serviços e que simultaneamente tem finalidades educativas ().

Tal como esta, as primeiras definições de *Learning Factories* surgem como uma descrição das primeiras e únicas L.F. existentes, sendo que ao longo do tempo foram mudando com o aprofundar da discussão da comunidade científica em torno do tema, principalmente após 2010 (Abele et al.,2015).

Com relação às dimensões apresentadas anteriormente, as várias definições que foram surgindo ao longo do tempo têm apenas uma abrangência parcial, conforme se pode verificar na tabela abaixo (Tabela 2), sendo que a definição apresentada pelo CWG da CIRP é que tem uma cobertura total das dimensões:

Tabela 2 – Cobertura das dimensões de acordo com as definições de Learning Factory
Fonte: Adaptado de Abele et al.,2015

Autor	Propósito	Processo	Configuração	Produto	Didática	Modelo Operacional
Jorgensen et al.(1995)						
Abele et al.(2010)						
Wagner et al.(2012)						
Tisch et al. (2013)						
Iniciative on Europe Learning Factories(2013)						
Chryssolouris et al.(2014)						
Sihn (2014)						
Kreimeier et al.(2014)						
Tracht (2014)						
CIRP CWG						

Cobertura Total
 Amplamente Coberto
 Coberto
 Pouco Coberto
 Sem Cobertura

Tendo em conta o nível de abrangência da definição do CWG CIRP, podemos considerar esta como uma das mais consensuais do mundo académico (Abele et al.,2015)

Uma *Learning factory* em sentido lato, é um ambiente de ensino especificado por:

- Processos: São genuínos, incluindo estações múltiplas e abrangem aspetos técnicos e organizacionais;
- Configuração: flexível e semelhante a uma cadeia de valor real;
- Produto: físico ou serviço e produzido na L.F.;
- Didática: com 3 dimensões de aprendizagem, formal, informal e não formal, possibilitadas pelas próprias ações dos formandos através de uma abordagem presencial.

A aprendizagem na L.F., dependendo do **propósito** desta, pode ocorrer através de ensino, treino ou investigação. Por conseguinte, os resultados podem ser de desenvolvimento ou inovação de competências. Do ponto de vista **operacional**, o cenário mais desejável é que todas as operações da L.F. sejam autossustentáveis.

A definição apresentada pelo CWG da CIRP pode ser tornada mais ampla se tivermos em conta que a configuração pode ser uma cadeia de valor virtual em vez de física, que o produto possa ser um serviço e que ao nível de didática, o ensino seja ministrado remotamente.

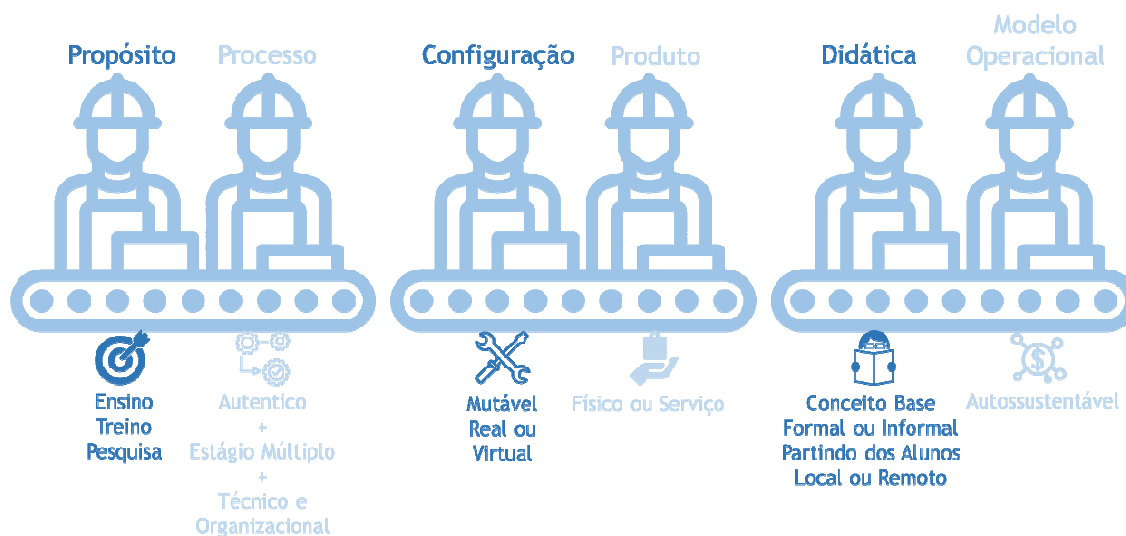


Figura 4 – Dimensões definatórias de L.F.
Fonte: Adaptado de Abele et al.,2015.

3.6 Análise e Configuração de uma *Learning Factory*

Devido às L.F. serem sistemas complexos, nos quais existem diversos conceitos e elementos inter-relacionados, a definição de uma estrutura holística para o conceito geral destas, estará associada a três níveis conceptuais (Tisch, Hertle, Abele, Metternich & Tenberg, 2015b):

- Nível Macro: Ambiente de aprendizagem, o programa e a abordagem didática geral;
- Nível Meso: Módulo de aprendizagem na qual são definidas as situações de ensino-aprendizagem e a preparação do ambiente para o conteúdo específico;
- Nível Micro: Situação de aprendizagem na qual inclui problemas específicos e tarefas usadas dentro de um módulo de aprendizagem.

Dependente do nível de estrutura e dos objetivos específicos da L.F., estas podem ser vistas como:

- Réplica de um ambiente real de produção (perspetiva fábrica);
- Ambiente de aprendizagem complexo (perspetiva ensino);
- Combinação de ambos.

Numa visão combinada, as L.F. são vistas como um ambiente de aprendizagem e ainda como um modelo sociotécnico, sendo que para configurar uma L.F., incluindo os módulos de aprendizagem, devem ser consideradas as suas implicações didáticas, sociais e tecnológicas (Tisch et al., 2015b).

Para a configuração de uma L.F., existem várias abordagens lineares, sequenciais e genéricas. Como o desenvolvimento de competências, de acordo com a bibliografia existente, é geralmente visto como o objetivo chave de uma L.F., a escolha destas influências é crucial no processo de estruturação (Tisch et al., 2015b).

Uma das abordagens alinhada com o desenvolvimento de competências é a abordagem holística com duas grandes transformações didáticas proposta por Tisch et al. (2015b). A primeira das transformações consiste na análise do ambiente, objetivos e grupos alvo juntamente com a definição das competências pretendidas e dos conteúdos de aprendizagem, podendo considerar-se uma transformação no sentido didático puro. Baseado nos resultados obtidos, a segunda transformação define os meios utilizados para ensino e os métodos didáticos utilizados para criação de valor na L.F. Abaixo é apresentado um esquema com três níveis conceptuais e as duas transformações didáticas:

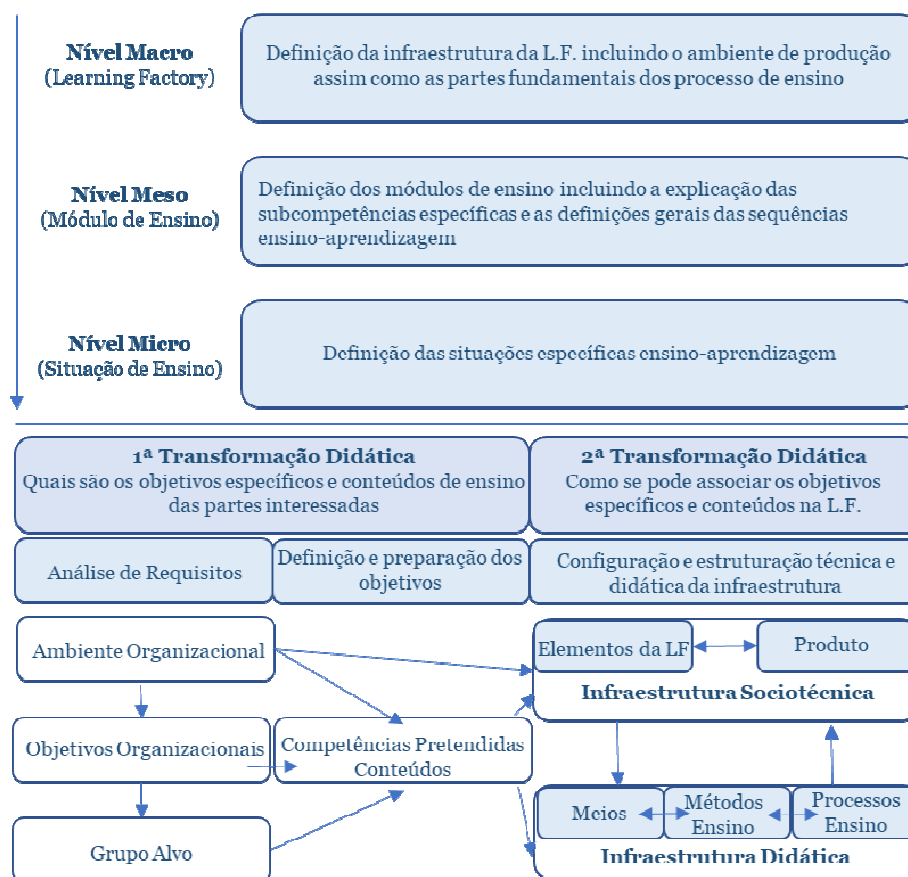


Figura 5 – Transformações didáticas e níveis conceptuais para a configuração de uma L.F.
Fonte: Adaptado de Tisch et al., 2015b

À primeira vista, o esquema ilustrado na figura 5 parece que funciona apenas de uma forma linear e direta, porém não é forçoso que isso aconteça. Deste modo, as setas apenas simbolizam a relação entre os elementos necessários para configurar uma L.F., por exemplo, se já existir uma ideia do produto a ser fabricado na L.F., nesse caso a segunda etapa será definir os objetivos específicos e os conteúdos em função do produto. Este exemplo demonstra que a configuração de uma L.F. é realizada de uma forma iterativa, utilizando diversos ciclos de feedback dentro do mesmo nível e entre os diferentes três níveis, por exemplo, a definição de um módulo de ensino no nível meso pode afetar a configuração do ambiente de produção no nível macro (Tisch et al., 2015b).

3.7 *Learning Factories* Existentes – Propósitos, Conceitos e Aplicações

Desde o projeto iniciado na Universidade de Penn State em 1994, no qual é cunhado o termo de *Learning Factory*, o conceito foi massificado mundialmente ao longo dos últimos anos por todo mundo, com enfoque especial na Europa. A nível morfológico, as L.F. variam em tamanho, propósito, produto e até em modernização, mas sempre focadas

em providenciar uma melhor experiência de ensino para formandos na cadeia de valor da área da indústria.

De modo a agrupar os diversos cenários de aplicação existentes ao nível das L.F., podemos agrupar as iniciavas de acordo o seu propósito principal. Conforme referido anteriormente, estas podem ser utilizadas com diferentes propósitos, sempre com a finalidade de oferecer uma experiência de ensino, sendo que estes podem ser divididos em ensino, treino ou pesquisa, podendo uma L.F. ter os três. Primeiramente, serão apresentados os diversos campos de aplicação e conceitos derivados dos propósitos principais e, posteriormente, serão identificadas algumas L.F. associadas a estes propósitos.

3.7.1. *Learning Factories* – Propósito Ensino

As L.F. que têm como o seu propósito principal o ensino, podem ser subdivididas em 2 tipos de modelos principais, projetos com um carácter geral ou cursos orientados e focalizados (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

No primeiro caso, trata-se de projetos com uma duração entre semanas a meses, nas quais os estudantes ou grupos trabalham para encontrar uma definição técnica ou solução organizacional para um problema ou requisito específico. Neste tipo de modelo não se pretende que os estudantes tenham um caminho restringido, sendo promovida a criatividade nas soluções, estando ligados a questões de pesquisa, sendo que também não estão dependentes de cursos específicos (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

Os cursos orientados e focalizados são um contraste em comparação com o primeiro caso, pois o nível de duração é entre horas a dias, são dados em sessões regulares durante um período de tempo, onde os estudantes trabalham num problema predefinido ou cenário conectado a uma teoria fundamental, onde o processo de procura de solução é restrito (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

Em ambos modelos existe uma interação entre a prática e a teoria, sendo que no primeiro será dada em ciclos longos e procura encontrar-se uma solução relevante para indústria e no segundo caso em ciclo curto com o objetivo de se encontrar uma solução para um problema específico (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

Para além destes modelos principais, nos quais o propósito principal da L.F. é o ensino, podem ainda ser identificados outros conceitos teóricos fundamentais que explicam o

porquê e como as L.F. podem ser incorporadas e utilizadas no decurso do processo de aprendizagem como por exemplo (Abele, Metternich & Tisch, 2019):

- Ensino ativo;
- Ensino com ação orientada;
- Ensino experiencial;
- Ensino baseado em jogos;
- Ensino baseado em problemas;
- Ensino baseado em projetos;
- Ensino baseado em pesquisa.

3.7.2. *Learning Factories* – Propósito Treino

As L.F. em que é identificado o treino como o seu propósito, podem ter diferentes papéis ou perseguirem diferentes objetivos, sendo que podem ser identificados três subtipos de propósitos diferentes (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

- Quando estas são usadas com a finalidade pura de treino, o desenvolvimento de competências pode ser identificado como o objetivo principal. Conceptualmente, são semelhantes quando o propósito é a educação e tornam as atividades bastante limitadas temporalmente.
- As L.F. que têm como propósito o treino, podem ser utilizadas também como uma abordagem para facilitar os processos de mudança nas organizações, onde para além dos tópicos técnicos, a motivação e a superação das barreiras internas dos participantes desempenham um papel fundamental.
- No contexto atual da indústria, com uma quarta revolução em marcha e com o aparecimento de novas tecnologias e conceitos associados à Indústria 4.0, o propósito de treino pode ser entendido como uma transferência de conhecimentos e inovação dando-se a conhecer aos participantes.

3.7.3. *Learning Factories* – Propósito Investigação

A relação entre as L.F. e a investigação pode ser dada de duas maneiras (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

- As L.F. como sendo o próprio objeto de investigação: durante os últimos anos, foi desenvolvido bastante trabalho neste campo, sendo que as publicações cresceram

exponencialmente, porém ainda existe muitos tópicos por abordar de modo a expandir as possibilidades e potencializar as L.F.

- As L.F. como motor para a investigação: a engenharia de produção, sendo uma ciência aplicada procura a descoberta de novos conhecimentos que sejam aplicáveis, onde as problemáticas de pesquisa surgem da prática industrial diária. Este processo de investigação funciona de uma forma pendular entre a teoria e a prática, entre a pesquisa, a análise e o empirismo do dia-a-dia. Um dos problemas da investigação associada à produção aquando a transferência de conhecimento e experimentação é a dificuldade de aplicabilidade, pois poderá criar instabilidade na produção em si, podendo ainda ser complexo e gerar custos elevados. As L.F. no campo de investigação podem ser bastante úteis à engenharia de produção pois absorvem as problemáticas referidas, diminuindo o risco de experiência prática e ainda com menor custo e complexidade, onde o processo de pesquisa funcionará em quatro fases:
 - Identificação do problema;
 - Abstração do problema com dados reais;
 - Solução com base teórica;
 - Aplicação da solução na prática verificando a existência de novos conhecimentos.

3.7.4. Exemplos de *Learning Factories* Existentes

Conforme indicado anteriormente, os propósitos de uma L.F. podem ser unicamente, ensino, treino ou pesquisa, como podem coexistir os três de uma forma simultânea. Para além desta dimensão, existem outras dimensões que podem ter mais do que uma característica para definir a L.F. Abaixo serão apresentados alguns casos de estudo de L.F. juntamente com as suas classificações morfológicas de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

AutFab - Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade de Ciências Aplicadas de Darmstadt na Alemanha.

Este projeto foi iniciado em 2009, aquando o Prof. Dr. Stephan Simons idealizou uma linha de montagem totalmente automatizada nos laboratórios da faculdade, porém devido às limitações de recursos humanos e financeiros, naquela fase apenas se avançou para a montagem automatizada. Através de um fundo, que curiosamente é aprovado essencialmente por estudantes, foi possível inaugurar em 2012 a linha completa, sendo que a simulação 3D desta linha já era utilizada em 2010 através de software Siemens. Em 2011, a primeira tese serviu de suporte para implementação de software de controle nas

estações de trabalho. Desde 2011, através de diferentes trabalhos, desenvolveu-se o sistema de uma linha de montagem automatizada para uma fábrica inteligente, sendo que esses trabalhos tinham como tema base a Indústria 4.0. Os autores destes trabalhos geraram uma relação lucrativa entre a faculdade e as empresas, pois através destes projetos conseguiram implementar na L.F. novas tecnologia, demonstraram às pequenas e médias empresas o potencial da Indústria 4.0, adquiriram habilidades que puderam transportar para as empresas contratadoras que procuravam alunos com capacidades interdisciplinares, de resolução de problemas, conhecimentos em processos de produção, entre outras características que adquiriram na AutFab.

A fábrica é operada por dois professores, o Prof Dr. Simons e o Prof Dr. Naser que orientam as tarefas de laboratório e os trabalhos dos estudantes, sendo que até ao dia de hoje 250 alunos já trabalharam em projetos ligados à Autfab. Esta possui uma área de 50 m² e produz variantes de relés, possuindo um sistema de armazenamento de alta capacidade, duas zonas de montagem e duas áreas de inspeção. O processo de fabrico passa por uma prensa pneumática para montar o relé, que posteriormente é verificado através de uma inspeção ótica automatizada, uma inspeção de peso e um teste funcional automatizado. As estações de trabalho são controladas por controladores lógicos programáveis (PLC – *Power Line Communication*) que estão interligados através de uma rede Ethernet industrial e comunicação bus clássica. Os diferentes produtos são montados numa sequência *one piece flow* apoiados pela tecnologia RFID (*Radio Frequency Identification*). Existem interfaces HMI com *touch panels* fixos e móveis, mas também através de *smartphones* e *tablets*. Existem *digital twins*, que foram criados para o comissionamento virtual, verificação do fluxo de matéria e simulação de consumo energético. A Autfab está conectada a um sistema de produção na rede da Universidade e a um ERP - *Enterprise Resource Planning* (Planeamento de Recursos Empresariais) com execução através de *cloud*. A linha de produção está também conectada em rede a uma solução da Siemens que fornece serviços de manutenção preditiva e de otimização da produção através de *cloud computing*.

A visão de futuro desta L.F. é o seu desenvolvimento contínuo com a implementação de novas tecnologias e ferramentas permitindo que este processo integrador dê aos alunos uma experiência de ensino, treino e pesquisa de modo a adquirirem qualificações-chave para iniciar uma carreira de sucesso no sector da automação.

Tabela 3 – Morfologias da AutFab de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP
Fonte: Adaptado de Abele, Metternich & Tisch, 2019

2.1	Propósito Principal	Ensino			Treino		Investigação					
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Testes / Piloto			Produção Industrial		Transferência de Inovação		Imagem Publica			
3.1	Ciclo de Vida Produto	Desenvolvimento Produto		Planeamento Produto	Prototipagem	Manufatura	Assemblagem	Logística	Reciclagem		Serviço	
3.2	Ciclo de Vida Fábrica	Conceito Fábrica	Plano Investimento	Planeamento Processo	Ramp-Up				Reciclagem		Manutenção	
3.3	Ciclo de Vida Pedido	Configuração & Pedido	Sequencia Pedido	Planeamento e Marcação					Recolha, Embalagem		Expedição	
3.4	Ciclo de Vida Tecnológico	Planeamento	Desenvolvimento	Testes virtuais					Modernização		Manutenção	
3.5	Funções Indiretas	Atividades Primárias					Atividades Secundárias					
		Logística Fluxo Entrada e Saída		Marketing & Vendas	Serviço		Instalações	HR	Inovação Tecnológica	Procurement		
4.1	Ambiente de Aprendizagem	Puramente Físico (Planeamento e Execução)		L.F. Física com Suporte Digital	Fluxo Físico da L.F. estendido a Virtual		Puramente Virtual (Planeamento e Execução)					
4.2	Escala do Ambiente	À Escala					Tamanho Real					

Festo Didactic *Learning Factories* – MPS, iCIM, CP Factory

A Festo Didactic desenvolve *Learning Factories* desde o ano de 1989, porém estas não são operadas pela própria empresa, mas sim pelos seus clientes, ou seja, estes desenvolvem as soluções que posteriormente são implementadas em L.F. pertencentes a estabelecimentos de ensino ou empresas.

A Festo Didactic é uma subsidiária da Festo Automação e inicialmente o seu intuito era dar formação relativamente a produtos da Festo, porém ao longo do tempo a sua missão evoluiu e hoje engloba tecnologias de produção, mecatrónica e eletrónica. A sua primeira L.F. nasceu a através de um projeto financiado em parceria com escolas profissionais surgindo o Sistema de Produção Modular (MPS – *Modular Production System*), com o objetivo de desenvolver competências que os módulos de treino de pneumática fornecidos não alcançavam, tais como a programação de PLC, descoberta de falhas, otimização, manutenção e configuração de linhas industriais, etc. O MPS é o equipamento oficial da competição internacional Worldskills Mechatronics desde o ano de 1990 e apesar das diferentes versões existentes ao longo do tempo, as suas características permanecem iguais:

- Processo extremamente simplificado;
- A escala de uma linha real e simplificada com um produto reutilizável;
- Abordagem de sistema modular;
- Foco no processo de assemblagem;

- Criado para treinar tecnologias de automação;
- Uso de componentes industriais;

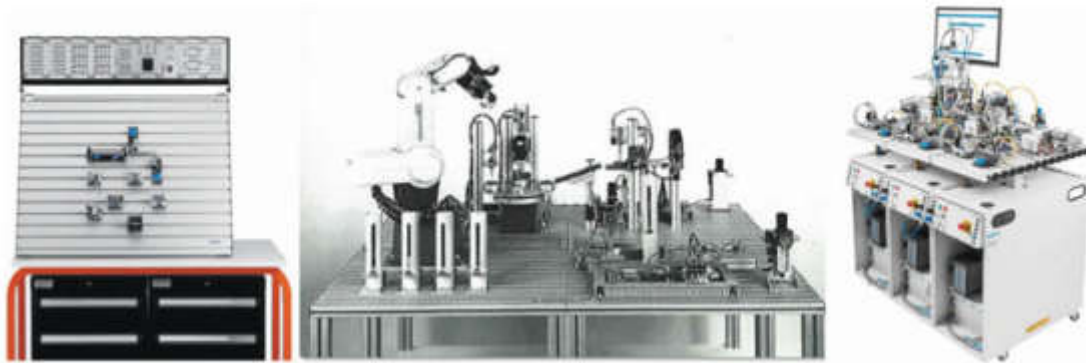


Figura 6 – Treino Pneumático (1980), 1º MPS (1988), 4º MPS(2017);
 Fonte: Abele, Metternich & Tisch, 2019

Pouco após o lançamento do MPS, foi lançado outro produto denominado iCIM que foi um sucesso ao longo dos últimos anos, no sentido de dar apoio às pesquisas no campo do CIM, dando soluções como:

- Máquinas de Controlo Numérico Computadorizado (CNC) com robot de carga;
- Armazéns automatizados;
- Materiais flexíveis transportados por sistemas;
- Controladores de linhas celulares;

Com o surgimento da I 4.0, foi necessário lançar soluções adequadas ao desafio como a *Cyber-Physical Factory* (CP Factory) que tem como características principais:

- Materiais transportados de forma mais versátil com transportador duplo;
- Alteração do layout dos módulos sem reprogramação;
- Controlo inteligente do fluxo dos materiais através de RFID;
- Sistema integrado de execução de produção (MES - *Manufacturing execution systems*);
- Conceção a serviços de produção através de *cloud*;

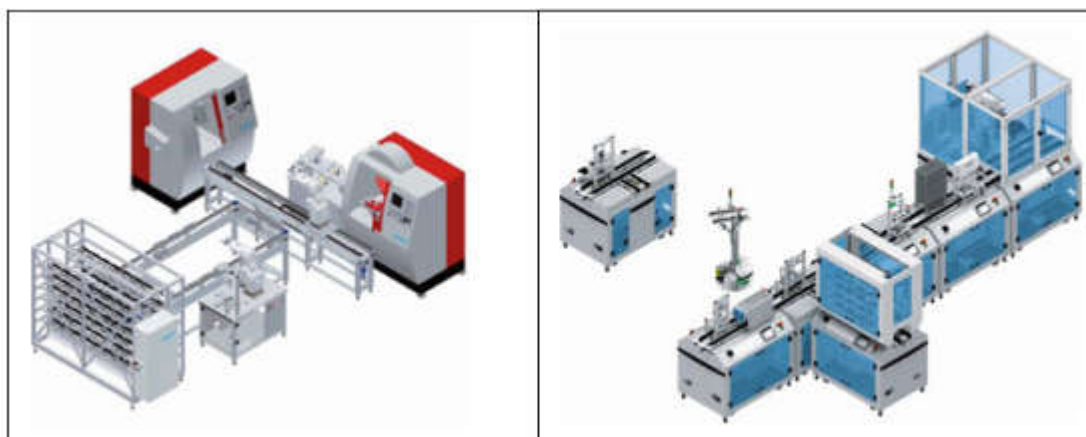


Figura 7 – iCIM(2005) e CP Factory(2016)
Fonte: Abele, Metternich & Tisch, 2019

Todos os módulos anteriormente referidos fabricam um produto, sendo que na maioria dos casos são utilizados produtos reutilizáveis para reduzir o custo das operações. Na primeira MPS o produto era um cilindro pneumático de ação simples, que podia ser assembled de forma automática e permitia uma verificação simples da qualidade (cor e altura do cilindro). Não existiam muitas variantes visto que não existia necessidade de complexidade, pois o propósito principal era treinar a programação de PLCs. No iCIM o produto associado é um *kit* para secretárias constituído por diferentes partes em alumínio maquinadas nas CNCs constituintes da iCIM. O produto da CP Factory é um dispositivo eletrónico simplificado (uma placa de circuito e o seu alojamento em duas partes). Esta solução pode ter processos como maquinação, perfuração, colagem e aquecimento.



Figura 8 – Produtos – (a)1ª MPS, (b)4ª MPS, (c) Kit Secretária, (d) Dispositivo eletrónico
Fonte: Abele, Metternich & Tisch, 2019

Tabela 4 – Morfologias das Festo Didatic L.F. de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP
Fonte: Adaptado de Abele, Metternich & Tisch, 2019

2.1	Propósito Principal	Ensino			Treino		Investigação					
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Testes / Piloto			Produção Industrial		Transferência de Inovação		Imagem Publica			
3.1	Ciclo de Vida Produto	Desenvolvimento Produto		Planeamento Produto	Prototipagem	Manufatura	Assemblagem	Logística	Reciclagem		Serviço	
3.2	Ciclo de Vida Fábrica	Conceito Fábrica	Plano Investimento	Planeamento Processo	Ramp-Up				Reciclagem		Manutenção	
3.3	Ciclo de Vida Pedido	Configuração & Pedido	Sequencia Pedido	Planeamento e Marcação					Recolha, Embalagem		Expedição	
3.4	Ciclo de Vida Tecnológico	Planeamento	Desenvolvimento	Testes virtuais					Modernização		Manutenção	
3.5	Funções Indiretas	Atividades Primárias							Atividades Secundárias			
		Logística Fluxo Entrada e Saída		Marketing & Vendas	Serviço		Instalações	HR	Inovação Tecnológica	Procurement		
4.1	Ambiente de Aprendizagem	Puramente Físico (Planeamento e Execução)		L.F. Física com Suporte Digital	Fluxo Físico da L.F. estendido a Virtual		Puramente Virtual (Planeamento e Execução)					
4.2	Escala do Ambiente	À Escala					Tamanho Real					

iFactory -Centro de Sistemas de Manufaturação Inteligente, Universidade de Windsor no Canada.

Um bom exemplo relativamente à aquisição e implementação de equipamento da Festo Didactic é a iFactory, implementada em 2011 através de financiamento proveniente de fundos de pesquisa onde a infraestrutura foi financiada pela Fundação para Inovação do Canada (CFI – Canada Foundation for Innovation) e pelo Ministério para Pesquisa e Inovação de Ontário (MRI - Ministry of Research, Innovation and Science) e ainda com algumas contribuições da indústria. As operações em curso e as pesquisas são suportadas pela Canada Research Chairs (CRC), Concelho de Pesquisa de Engenharia e Ciências Naturais do Canada (NSERC - Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada) e subvenções e contratos industriais.

A iFactory permite uma experiência de ensino bastante completa, desde a fase de conceção no Estúdio de Inovação de Design (iDesign) passando também pelas fases de prototipagem, planeamento de produtos e processos (iPlan) e produção (iFactory) suportada por configurações de algoritmos e metodologias e sistema de síntese.

O *layout* é modular e reconfigurável sendo possível alterar os módulos da Festo Didactic, adicionando, removendo ou simplesmente relocando-os, existindo módulos de assemblagem manuais e robóticos que são *plug’n produce*. Ao nível de *hardware*, existe também inspeção visual computacional, armazenamento automático e sistema de recuperação (ASRS - *Automated Storage and Retrieval System*), módulos de

manuseamento de material, comunicação RFID, sistema de controlo SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) Siemens. A mudança de *layout* é bastante rápida e fácil, pois através das interfaces padronizadas e controlo inteligente com reconhecimento periférico, não é necessária a programação ou mudança de configuração após as alterações efetuadas.

Na iDesign existem equipamentos gráficos com aplicações robustas para promover um design inovador e interações de grupo, onde são realizadas sínteses de projeto, configurações, modelações, análises de integração de processos, produtos e desenvolvimento de sistemas produtivos.

Os produtos assemblados são de duas famílias, família de produtos para secretárias como suportes para materiais de escritório ou família de tensores de correias para motores. A palete logística que contém os produtos é equipada com etiquetas RFID permitindo o rastreamento dos processos, planeamento e histórico.

Através dos diversos módulos que constituem esta L.F. é possível fornecer uma experiência única de ensino, treino e pesquisa para estudantes universitários, pós-graduação, profissionais em formação ou pesquisadores dos quais resultaram trabalhos inovadores em diversas vertentes como na gestão de variedade produtos, complexidade de sistemas produtivos, desenvolvimento do *Digital Twin da Ifactory* ou aplicações para Indústria 4.0, entre outros.

Tabela 5 – Morfologias da iFactory de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP
Fonte: Adaptado de Abele, Metternich & Tisch, 2019

2.1	Propósito Principal	Ensino			Treino		Investigação			
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Testes / Piloto			Produção Industrial		Transferência de Inovação		Imagem Publica	
3.1	Ciclo de Vida Produto	Desenvolvimento Produto		Planeamento Produto	Prototipagem	Manufatura	Assemblagem	Logística	Reciclagem	Serviço
3.2	Ciclo de Vida Fábrica	Conceito Fábrica	Plano Investimento	Planeamento Processo	Ramp-Up				Reciclagem	Manutenção
3.3	Ciclo de Vida Pedido	Configuração & Pedido	Sequencia Pedido	Planeamento e Marcação					Recolha, Embalagem	Expedição
3.4	Ciclo de Vida Tecnológico	Planeamento	Desenvolvimento	Testes virtuais					Modernização	Manutenção
3.5	Funções Indiretas	Atividades Primárias							Atividades Secundárias	
		Logística Fluxo Entrada e Saída		Marketing & Vendas	Serviço	Instalações	HR	Inovação Tecnológica	Procurement	
4.1	Ambiente de Aprendizagem	Puramente Físico (Planeamento e Execução)		L.F. Física com Suporte Digital	Fluxo Físico da L.F. estendido a Virtual		Puramente Virtual (Planeamento e Execução)			
4.2	Escala do Ambiente	À Escala					Tamanho Real			

MPS Lernplattform na Daimler AG em Sindelfingen na Alemanha

No seguimento da difusão na Europa da metodologia *Lean* proveniente do Japão, a Daimler adaptou-a, tal como as outras empresas do ramo automóvel, e no sentido de poder formar os seus colaboradores criou em 2011 uma *Learning Factory* em torno desta temática nascendo desta forma a MPS lernplattform, onde MPS significa Mercedes-Benz Sistema de Produção.

A Daimler reuniu especialistas de diversas áreas e formou-os no sentido de melhorarem as suas qualificações como formadores, neste momento a quantidade de membros da equipa é superior a uma dezena. Apesar destes formadores pertencerem à Daimler, nos últimos anos foi desenvolvida também uma parceria com a Universidade Técnica de Darmstadt, fornecendo *know-how* para esta L.F.. O número de formandos que já passou pela L.F. está perto dos 10.000 e o target desta formação são executivos, planeadores de produção, engenheiros de fábrica, gestores da melhoria. O conteúdo programático abrange todas áreas do processo produtivo sendo adaptável ao grupo alvo, sendo também dinâmico tendo em conta a evolução dos temas, onde o mais importante é o conhecimento ser transmitido da forma mais prática.

O *layout* desta L.F. tem uma área de 3000 m² e são utilizados durante o treino componentes reais e modelos à escala 1:10 para uma experiência mais fidedigna, existindo

diversos módulos de ensino como a oficina de pintura, oficina das prensas, oficina das carroçarias, montagem e logística, onde o foco não é apenas nos processos de valor acrescentado mais também perceber como planejar e realizar uma gestão *lean*. Os produtos utilizados durante o processo de ensino são reutilizáveis e reais como por exemplo as unidades de controlo dos tetos, viseiras para o sol, pisos do carro ou montagem de carros de modelos mais pequenos.

A nível didático o treino ocorre numa porção de 20% de teoria e 80% de prática permitindo aos trabalhadores adquirirem conhecimentos, praticarem e associarem ao seu trabalho diário, pois o efeito de aprendizagem e memória através da experiência pessoal e da compreensão dos conteúdos tem maior eficácia. A dimensão do grupo de ensino varia entre 10 e 20 pessoas de modo a ser mais agradável, permitindo trabalho em grupo e melhor interação entre o aluno e os formadores de áreas diferentes, desenvolvendo novas formas de pensar e compreender tópicos diferentes.

Tabela 6 – Morfologias da MPS Lernplattform de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP

Fonte: Adaptado de Abele, Metternich & Tisch, 2019

2.1	Propósito Principal	Ensino			Treino			Investigação		
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Testes / Piloto			Produção Industrial		Transferência de Inovação		Imagem Publica	
3.1	Ciclo de Vida Produto	Desenvolvimento Produto		Planeamento Produto	Prototipagem	Manufaturaçã	Assemblagem	Logística	Reciclagem	Serviço
3.2	Ciclo de Vida Fábrica	Conceito Fábrica	Plano Investimento	Planeamento Processo	Ramp-Up				Reciclagem	Manutenção
3.3	Ciclo de Vida Pedido	Configuração & Pedido	Sequencia Pedido	Planeamento e Marcação					Recolha, Embalagem	Expedição
3.4	Ciclo de Vida Tecnológico	Planeamento	Desenvolvimento	Testes virtuais					Modernização	Manutenção
3.5	Funções Indiretas	Atividades Primárias							Atividades Secundárias	
		Logística Fluxo Entrada e Saída		Marketing & Vendas	Serviço	Instalações	HR	Inovação Tecnológica	Procurement	
4.1	Ambiente de Aprendizagem	Puramente Físico (Planeamento e Execução)		L.F. Física com Suporte Digital	Fluxo Físico da L.F. estendido a Virtual			Puramente Virtual (Planeamento e Execução)		
4.2	Escala do Ambiente	À Escala					Tamanho Real			

3.8 Learning Factories e a Indústria 4.0

Conforme referido anteriormente, o número de artigos relativamente à temática das *Learning Factories* cresceu exponencial assim como as iniciativas indexadas à Indústria 4.0, tornando-se duas temáticas em crescente no plano académico e industrial.

Apesar do *boom* ser recente, as L.F. são utilizadas cada vez mais como uma plataforma de transferência de conhecimento e competência, quer seja para formação, treino ou até pesquisa a nível académico e industrial (Abele et al.,2015).

De acordo com Cachay et al. (2012), a aprendizagem através da prática possibilita uma maior retenção de conhecimento quando comparado com os métodos tradicionais. Schuster et al. (2015) indicam também que a formação dada externamente ao local de trabalho é associada a enormes perdas, devido às metodologias tradicionais de ensino e aprendizagem que não acompanham a complexidade dos produtos e processos atuais ligados à customização em massa que esta nova geração da indústria tem vindo a implementar.

As L.F. são necessárias como uma nova abordagem de ensino, de modo a modernizar o sistema de ensino e convergir com as necessidades do novo paradigma Industrial (Sackey, Bester & Adams, 2017).

3.9 Relação entre o Ensino e Indústria em Portugal

Através do documento lançado pela CIP em 2017 (CIP, 2017) é possível analisar o paradigma da Indústria 4.0 em Portugal e a sua relação com o sistema de ensino.

De acordo com a CIP (2017), o processo de reindustrialização associado ao conceito de Indústria 4.0, não significa voltar a um modelo do passado com mão de obra barata, mas sim evoluir para um modelo económico apoiado no conhecimento e transportar para o mercado de trabalho formandos em articulação com Universidades, Politécnicos e o Sistema da Ciência e Tecnologia, para que a reindustrialização não esteja associada unicamente à produção de produtos, e sim, a todos os bens e serviços transaccionáveis.

Conforme afirmou Porter em 1992, Portugal está preso no meio dos países com economias do conhecimento e os que competem através dos salários baixos. Por mais atrativo que seja o paradigma salarial em Portugal irão sempre existir países e regiões com salários mais baixos que nós. Nesse sentido será cada vez mais importante ligar a produção de conhecimento às empresas para que estas agarrarem o modelo de economia do conhecimento (CIP, 2017).

Com a crescente digitalização, os sectores ou profissões sofrerão alterações todos os dias, por isso é necessário formar pessoas, especialmente os mais jovens, com competências transversais para as necessidades que o mercado de trabalho exigirá, ao invés de formar

para as profissões atuais, visto que é estimado que 10 a 15% dos empregos atuais no sector industrial serem substituídos num prazo de 10 anos (CIP, 2017).

Outro problema que é levantado é o crescente investimento público nos doutoramentos que não tem repercussão nas empresas em Portugal. Os números indicam que o investimento em doutoramentos em Portugal em 1982 era 32M€ e que em 2013 era 2321M€, sendo que o número de doutorados passou de 8275 em 1991 para 26175 em 2011, um crescimento que não teve aproveitamento nas empresas porque passaram de 104 (1999) doutorados em atividade nas empresas para apenas 709 (2011). De verificar ainda que houve um decrescimento de doutorados em Engenharia e Tecnologia entre 1999 e 2011 de 10,82% (CIP,2017).

No documento lançado pela CIP existem diversas recomendações relativamente às políticas de ciência, tecnologia e inovação, mas existem algumas a ressaltar no que concerne à relação entre as instituições de ensino e a indústria (CIP, 2017):

- Lançamento de um Programa Universidade-Indústria com o intuito de melhorar a imagem da indústria nacional perante os jovens estudantes, para que se perceba que a indústria atualmente não é manufatura massificada, mas sim criatividade, design, conhecimento e inovação. Fazer um melhoramento aos cursos do ensino superior e universitário de modo a terem ferramentas ajustadas à indústria moderna. Amplificar o apadrinhamento empresarial de modo a promover a inovação tecnológica.
- Lançamento de um programa com as Universidades e Institutos de Formação para Executivos de formação-ação com o objetivo de introduzir jovens quadros nas empresas.
- Promover a ligação entre o conhecimento, a cultura empresarial e o desenvolvimento de projetos tecnológicos nos finalistas do ensino superior e os alunos de doutoramento com enfoque nas empresas e suas necessidades, tal como acontece no modelo Norte Americano.
- Melhorar o sistema de incentivos financeiros à inovação e investigação orientada para a indústria nas empresas, com enfoque nas universidades e centros de conhecimento, sendo que o financiamento de projetos de investigação e desenvolvimento com relevância nacional, não deve ser feito diretamente às Universidades, mas sim às empresas.

Portugal teve uma evolução significativa do ponto de vista da base científica e tecnológica e produção de conhecimento. Neste momento é necessário ligar a produção de conhecimento às empresas com intuito de promover a inovação. A interação entre as

instituições de ensino, em especial as Universidades, com a indústria deve ser feita do seguinte modo (CIP, 2017):

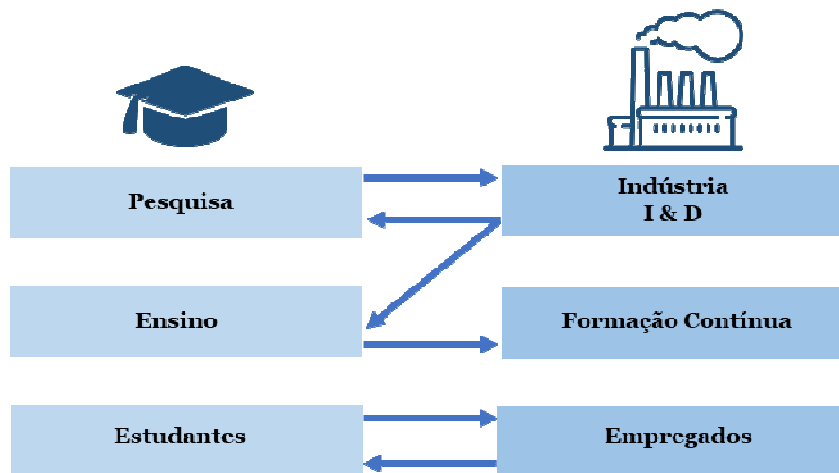


Figura 9 – Relação Universidades e Indústria
Fonte: Adaptado de CIP, 2017

4. Prototipagem Rápida

Este capítulo visa apresentar o serviço que será escolhido como base para a possível *Learning Factory* a implementar na U.B.I., dando a conhecer os principais processos de produção aditiva.

4.1 Justificação

O presente capítulo é uma revisão bibliográfica referente aos processos de prototipagem rápida com ênfase nos processos de produção aditiva, sendo estes processos parte integrante do mosaico tecnológico da I 4.0. , sabendo que o objetivo principal deste trabalho é apresentar uma proposta para a implementação de uma *Learning Factory* na Universidade da Beira Interior com a premissa principal de estar ligada à Indústria 4.0., assim sendo este capítulo servirá como suporte à escolha do processo para a L.F. e apresentação das diversas soluções que poderão ser implementadas na L.F. no futuro.

4.2 Introdução

O protótipo pode ser definido como um artefacto que atinge um ou múltiplos recursos de um produto, serviço ou sistema (Otto & Wood, 2001).

O recurso ao serviço de prototipagem já é antigo, pois na época Renascentista, Michelangelo utilizou protótipos físicos para comunicar detalhes de construção e marketing para investidores, assim como Palladio também utilizou protótipos à escala total em madeira de elementos arquitetónicos para planear obras em pedra com custo elevado (Sass & Oxman, 2006). Já no século XX, Henry Ford realizou diversos protótipos antes de lançar o icónico modelo T (Womack, Jones & Roos, 2008).

A necessidade do desenvolvimento da prototipagem rápida (RP - *Rapid Prototyping*) foi de cariz económico, pois permitia a criação de modelos físicos para validações de novos designs de uma forma rápida e com baixo custo, podendo ser antecipados problemas que surgiriam em fases mais avançadas criando um incremento dos custos no projeto pondo assim em causa a sua viabilidade (Noorani, 2016).

Os processos RP consistem na transformação de um modelo 3D criado através do computador ou processados através de *scan* 3D numa forma física através de processos aditivos ou subtrativos. Estes processos são utilizados para produção de peças

customizadas e em séries pequenas entre as quais estão os protótipos. Os processos subtrativos consistem na transformação da matéria prima até se atingir o produto final através de fresas, laminas, laser, plasma com o apoio de mesas de trabalho ou braços robóticos controlados através de CNC. Estes processos criam bastante desperdício quando comparados com processo aditivos que consistem na adição de camadas de matéria prima sequencialmente durante o processo de construção com o fim de construir um modelo 3D previamente definido. (Noorani, 2016).

Os processos aditivos cresceram bastante durante os últimos anos especialmente deste a introdução da estereolitografia (SLA - *Stereolithography*) no mercado aparecendo outras tecnologias de fabricação por camadas (LM - *Layered Manufacturing*) aumentando o seu campo de utilização, sendo que atualmente não são utilizadas apenas para visualizar ideias de design, mas também utilizados para a produção de moldes e ferramentas, designado também de ferramentas rápidas (RT – *Rapid Tooling*) ou a produção de peças finais através da fabricação rápida (RM – *Rapid Manufacturing*). A utilização de processos aditivos para o consumidor final tem vindo a aumentar, sendo utilizados para fins médicos como na produção de próteses dentárias ou aparelhos auditivos ou então em áreas como a indústria, arquitetura, desenvolvimento urbano ou joalheria. De acordo com a figura abaixo pode-se perceber a sua distribuição por área de negócio (Noorani, 2016):

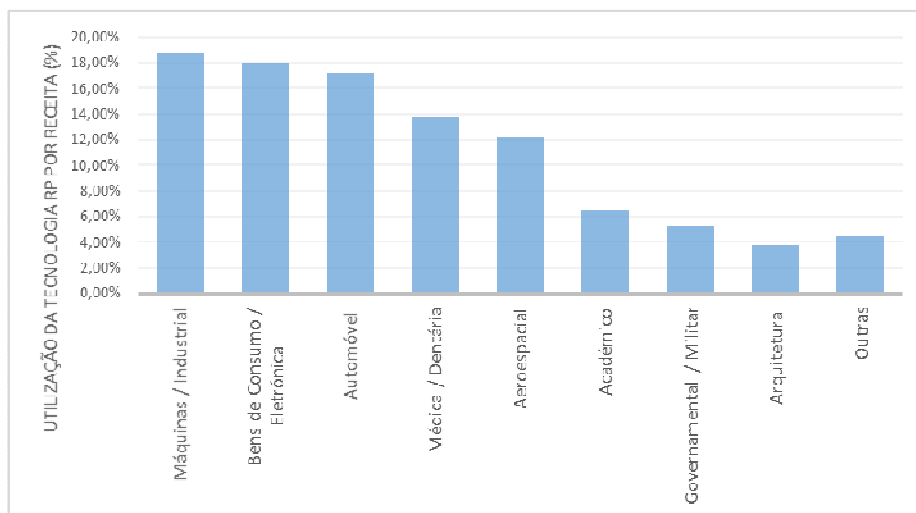


Figura 10 – Relevância comercial das tecnologias RP por área de negócio
Fonte: Adaptado de Gurr & Mülhaupt, 2016

A classificação dos processos RP pode ser efetuada de acordo com o estado físico inicial da matéria prima a ser utilizada, podendo ser sólido com 0, 1 ou 2 dimensões, ou seja pó, filamento ou folha, respetivamente, ou poderá ainda estar no estado líquido. Relativamente ao tipo de matéria prima, existem diversas soluções como metais, polímeros, cerâmicas, líquidos curáveis e congeláveis ou gases precursores reativos.

Relativamente ao princípio de conversão pode ser através de polimerização térmica ou fotoquímica induzida, união de pós, solidificação de fusões ou deposição de vapor químico. Abaixo é apresentada um esquema resumo da classificação dos RP de acordo com estado físico da matéria prima (Gurr & Mülhaupt, 2016):

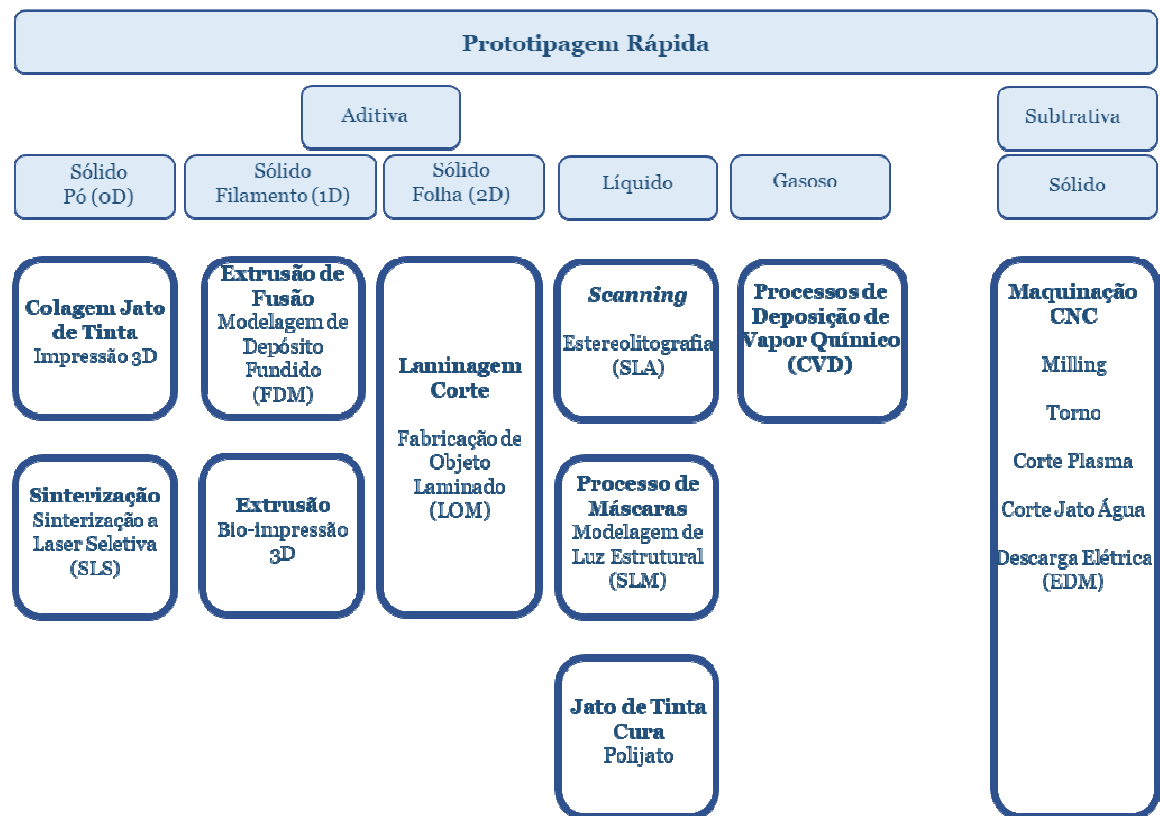


Figura 11 – Classificação dos processo RP de acordo com estado físico da matéria-prima
Fonte: Adaptado de Gurr & Mülhaupt, 2016

Para ser efetuada a correta escolha de um processo de RP é necessário conhecer os pontos fortes e fracos de cada tecnologia e perceber as características e limitações. Na tabela abaixo são apresentadas comparações genéricas dos pontos chaves das diferentes tecnologias RP, onde os valores de custo apresentados podem variar de acordo com o material utilizado, principalmente o custo final dos protótipos. Nos próximos subcapítulos vão ser também descritos estes processos (Gurr & Mülhaupt, 2016).

Tabela 7 – Comparação das características chave das tecnologia RP
Fonte: Adaptado de Gurr & Mülhaupt, 2016

Processos RP	Matéria Prima	Dimensão Máxima do Protótipo (mm)	Precisão (mm)	Ano de Entrada no Mercado	Custo da Máquina (€)	Custo do Protótipo
SLA	Resinas Fotocuráveis (Epóxis e Acrílicas)	1500 x 600 x 500	<0.05	1987	>10.000	Médio
SLS	Metais, Areia, Termoplásticos (PA12, PC)	700 x 380 x 580	<0.05 - 0.1	1991	>150.000	Médio - Elevado
LOM	Papel, Polímeros, Metal, Cerâmicas	550 x 800 x 500	0.15	1990	>50.000	Baixo - Médio
FDM	Termoplásticos (ABS, PC)	914 x 610 x 914	0.1	1991	>10.000	Baixo - Médio
Bio-impressão 3D	Termoplásticos, Hidrogéis, Cerâmicas	150 x 150 x 140	0.1	2001	>150.000	Baixo - Médio
Impressão 3D	Termoplásticos, Metais, Cerâmicas	4000 x 2000 x 1000	0.1	1998	>20.000	Baixo

4.3 Processo Aditivos com Materiais Líquidos

Abaixo serão descritos alguns dos processos aditivos que utilizam a matéria prima no estado líquido sendo que as suas principais características são:

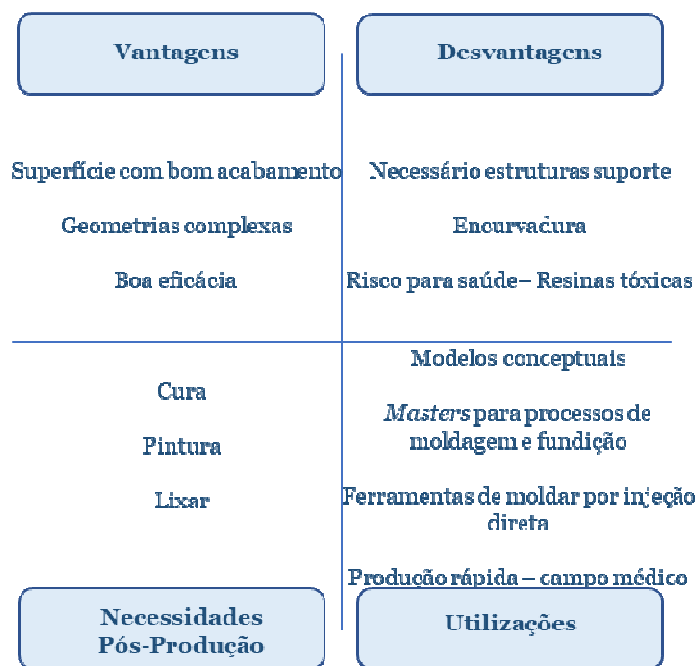


Figura 12 – Características principais dos processos RP com utilização de líquidos
Fonte: Adaptado de Gurr & Mülhaupt, 2016

4.3.1. SLA - Estereolitografia

Apesar da primeira publicação acadêmica relativamente à estereolitografia ter surgido em 1981, demorou cinco anos a ser registada a primeira patente (1986). Nos anos seguintes surgiram as versões comerciais do processo trazidas pela 3D Systems nos EUA (1987) e a

C-Met no Japão (1988), desde essa data o volume de vendas aumentou sendo que neste momento é uma das tecnologias RP mais importantes e pesquisadas.

Tal como os outros processos de RP, o processo é iniciado com design em CAD ou baseado num scan termográfico, onde o corpo 3D virtual gerado é dividido em camadas e essa informação é respetivamente transferida para o dispositivo SLA. A resina fotopolimerizável situa-se na cuba da máquina e é seletivamente curada de acordo com os parâmetros do CAD. A reação de polimerização é iniciada através de um laser ultravioleta (UV), onde é desenhado primeiro o contorno exterior da camada sendo depois definida a área envolvente. A resolução lateral do processo de solidificação é definida pelo diâmetro do feixe de luz UV que varia em torno dos 50µm. A profundidade da camada de resina curada depende da exposição, que pode variar tendo em conta a potência do laser ou velocidade de processamento. O algoritmo que determina o caminho percorrido pelo laser UV influencia a eficácia do processo. Uma profundidade de cura adequada deve ser superior à espessura das camadas com intuito de permitir uma boa adesão entre elas sem que se diminua a resolução vertical do produto.

Após completo o processo de cura de uma camada, o modelo que está preso à plataforma de construção é levantado e a superfície da resina é alisada com uma lâmina de limpeza para que o modelo seja novamente afundado verticalmente na cuba cheia de resina numa altura entre 30 e 100 mm que é a quantidade necessária para a construção da camada seguinte. Este processo é repetido até que o modelo esteja pronto com todas as camadas criadas para que possa ser retirado do recipiente de resina. Removendo o modelo da máquina SLA é necessário lavar com solventes adequados e retirar as estruturas de suporte para que posteriormente se efetue um tratamento térmico no produto.

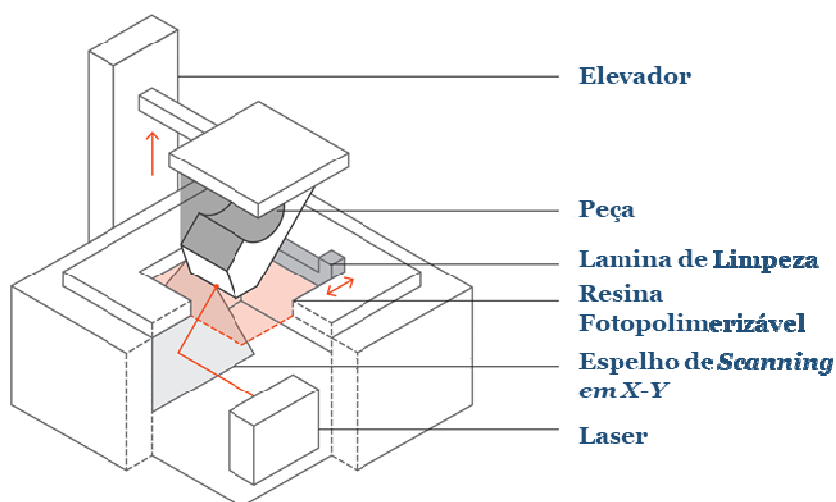


Figura 13 – Processo SLA
Fonte: Adaptado de 3D Hubs, 2019

4.3.2. Polijato

É um processo comercializado desde 2001 (Object Geometries Ltd) e é uma mistura entre a impressão 3D e o processo SLA, onde as camadas são impressas sequencialmente numa plataforma de construção movida verticalmente, semelhante ao processo de impressão 3D, usando um processo de impressão a jato de tinta. Na cabeça da impressora estão integrados bicos de jato de tinta para depositar a resina foto curável e uma lâmpada UV para realizar o processo de cura, ou seja, vai sendo injetada e curada a resina e quando terminada uma camada a plataforma desce o equivalente a espessura de uma camada para ser realizada a seguinte até que todo o protótipo esteja finalizado. Comparado com o processo SLA a resolução do protótipo é superior e não necessita de processo de cura após finalizado, podendo ser limpo apenas com uma limpeza a jato de água. A utilização da tecnologia de jato de tinta permite criar protótipos multicoloridos.

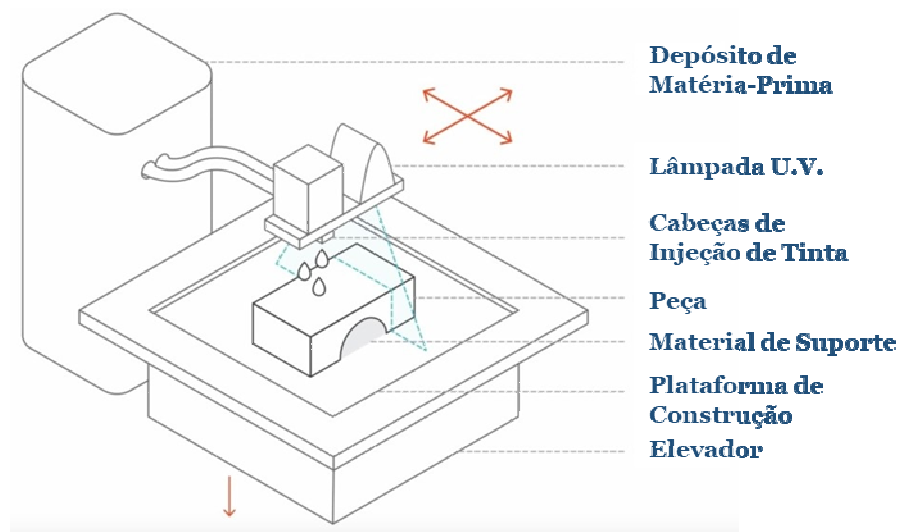


Figura 14 – Processo Polijato
Fonte: Adaptado de All3DP.com, 2019

4.4 Processo Aditivos com Utilização de Pós

Abaixo serão descritos alguns dos processos aditivos em que matéria prima utilizada é pó (estado sólido) onde as suas principais características são:

Vantagens	Desvantagens
Sem necessidade de pós-cura	Má resolução
Variedade de matérias-primas (metais, cerâmicas e polímeros)	Máquinas com grande tempo de aquecimento e arrefecimento
Sem necessidade de estrutura suporte	Muito empenamento, especial em peças cristalinas
Impregnações com resinas polímeras	Não aplicável em escritórios
Sinterização, prensagem isostática, impregnação com ligas de baixo ponto de fusão ou precursores cerâmicos em peças metálicas, cerâmicas e compósitos)	Prototipagem funcional
Necessidades Pós-Produção	Ferramentas metálicas
	Peças cerâmicas avançadas
	Engenharia de tecidos
	Utilizações

Figura 15 – Características principais dos processos RP com utilização de pós
Fonte: Adaptado de Gurr & Mülhaupt, 2016

4.4.1. 3DP (3D Printing) – Impressão 3D

Esta tecnologia foi desenvolvida em 1986 por Sachs e seus colaboradores e desde aí a sua procura cresceu até se tornar um dos processos RP ser mais vendidos do mercado, existindo várias empresas a comercializarem-no, sendo a mais conhecida a 3D Systems.

A máquina é constituída por uma plataforma de construção que se move verticalmente, uma unidade de distribuição de pó e uma cabeça injetora de jato de tinta. Após o design realizado em CAD e definidas as camadas de construção é distribuído uniformemente uma porção de pó através do movimento horizontal do dispensador de pó. No passo seguinte é injetada a tinta no pó de uma forma seletiva para solidificar este de modo a formar a primeira camada. Assim que concluída, a plataforma de construção desce numa distância igual à espessura de uma camada para que seja realizada a seguinte da mesma forma que descrita a primeira. A camada de pó que não foi colada continua sempre na plataforma de construção de modo a suportar o protótipo em construção. Após a conclusão, são retirados o protótipo e a camada de pó não utilizada, que é colocada no seu depósito para que seja reutilizada. Os protótipos são limpos com ar comprimido de modo a tirar os pós não utilizados, podendo ainda ser efetuadas operações de pós-produção para reforço através da impregnação de resinas.

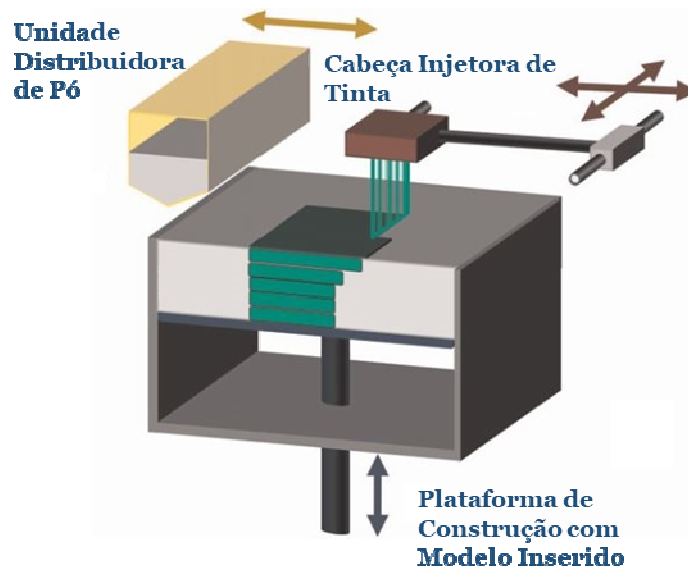


Figura 16 – Processo 3DP
 Fonte: Adaptado de Gurr & Mülhaupt, 2016

4.4.2. SLS – Sinterização a Laser Seletiva

O processo SLS foi desenvolvido em 1986 por Deckard na Universidade do Texas, sendo que atualmente existem dois grandes fornecedores destas máquinas a 3D Systems e a EOS GmbH. Este processo tem características idênticas ao processo 3DP e SLA, no entanto o processo de fabrico ocorre a temperaturas elevadas, um pouco abaixo do ponto de deformação plástica de modo a diminuir o tempo de processamento, reduzir as tensões induzidas e distorções de encurvadura que ocorrem durante a solidificação das camadas. É necessária uma atmosfera inerte dentro da máquina para evitar a oxidação de materiais termicamente induzidos.

A máquina é constituída por um depósito de pó, um rolo de distribuição de pó, uma plataforma de construção com movimentação vertical, um laser a CO₂ (dióxido de carbono) e um sistema ótico para direcionamento do laser. O processo consiste em inicialmente colocar pó na plataforma de construção transferido dos depósitos que sobem e com ajuda do rolo são colocados nesta. A primeira camada de pó é solidificada através do varrimento do feixe de laser em cima do pó de acordo com o definido em CAD inicialmente. Após construída a primeira camada, a plataforma de construção desce a espessura de uma camada e é depositado e varrido mais pó como na primeira camada e posteriormente sinterizado através de laser. Tal como no processo 3DP, o pó não utilizado é colocado no seu depósito de modo a ser reutilizado e o protótipo terminado é removido.

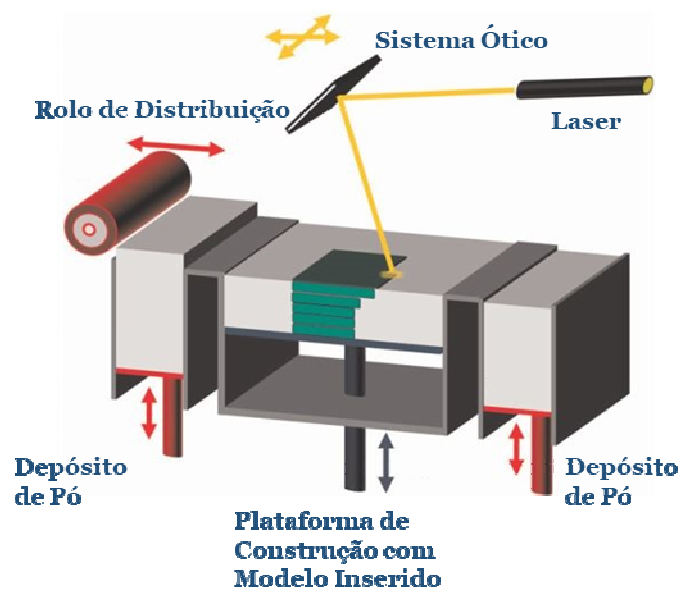


Figura 17 – Processo SLS
Fonte: Adaptado de Gurr & Mülhaupt, 2016

4.5 Processos Aditivos com Utilização de Filamentos

Abaixo serão descritos alguns dos processos aditivos em que matéria prima utilizada são filamentos (estado sólido) onde as suas principais características são:

Vantagens	Desvantagens
Variedade de matérias-primas	Necessidade de estruturas de suporte (FDM)
Máquinas fáceis de manusear	Encurvadura / Empenamento
Possibilidade de fabrico de modelos com necessidade de definição de porosidade	Má resolução
	Processo lento para peças volumosas
Lixar	Modelos conceptuais
Suavizar com solventes	Prototipagem funcional
Sinterizar e impregnar (FDMet, FDC)	Engenharia de tecidos ou aplicações na impressão de órgãos
Necessidades Pós-Produção	Utilizações

Figura 18 – Carecterísticas principais dos processos RP com utilização de filamentos
Fonte: Adaptado de Gurr & Mülhaupt, 2016

4.5.1. FDM (*Fused Deposition Modeling*) – Modelagem de Depósito Fundido

Este processo é bastante procurado porque permite utilizar uma gama diversa de materiais e o seu processo de criação de camadas é simplista, sendo que uma das empresas que efetua a sua comercialização é a Stratsys Inc. Neste processo a matéria-prima de modelagem e suporte são alimentados na máquina em forma de filamentos que, através de rodas motrizes são transportados para a unidade de depósito aquecida, que extrude o material através das ponteiros aquecidas. De acordo com camadas definidas em CAD previamente, os fios extrudidos vão sendo depositados de forma horizontal na plataforma de construção. O tempo de processamento é bastante rápido porque os filamentos são aplicados perto da temperatura de fusão do material. Após a conclusão da primeira camada, a plataforma de construção desce uma distância igual à espessura de uma camada, para seja realizada a seguinte de acordo com processo previamente descrito.

Os caminhos realizados para a distribuição do filamento definem propriedades como a rugosidade superficial, a anisotropia das propriedades mecânicas e a duração da construção. De uma forma geral, primeiro são desenhados os contornos da camada só depois o interior.

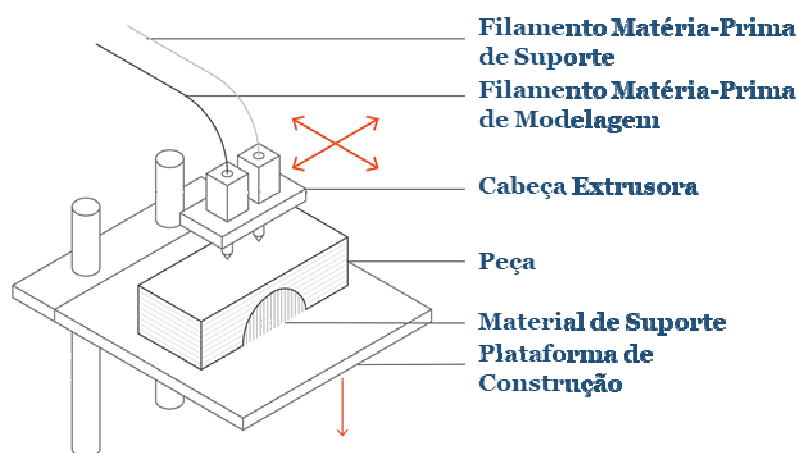


Figura 19 – Processo FDM
Fonte: Adaptado de All3DP.com, 2019

4.5.2. Bio-impressão 3D

Este processo foi criado em 1999 na Freiburg Materials Research Center e hoje em dia é comercialmente distribuído pela Envisiontec GbmH, tendo características semelhantes ao processo FDM tem possibilidade de utilizar uma maior gama de termoplásticos. Os pós e *pellets* são abastecidos num depósito na unidade dispensadora que os funde termicamente

antes de os depositar através das ponteiros na plataforma de construção. A deposição do material é realizada de acordo com o definido em CAD e em vez de ser a plataforma de construção a se movimentar é a unidade dispensadora que sobe uma distância igual à próxima camada.

Este processo permite a construção em meios líquidos, desde que exista um balanceamento correto entre as densidades dos materiais e meio líquido, onde a gravidade é compensada pela impulsão, permitindo a impressão de “gravidade zero”, que permite fabricar estruturas complexas ou modelos porosos sem necessidade de estruturas suporte.

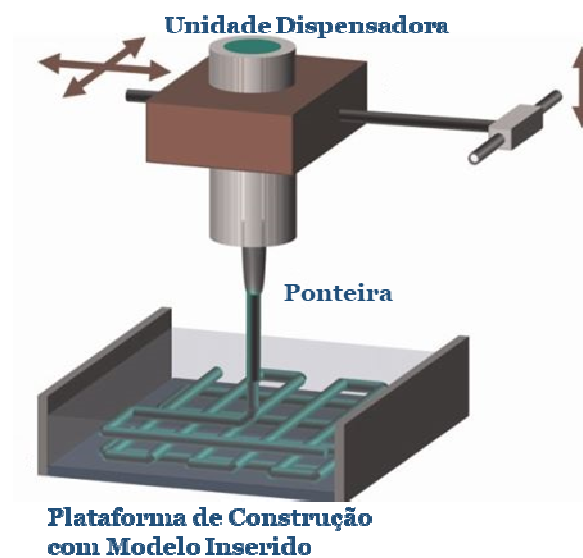


Figura 20 – Processo Bio-Impressão 3D
Fonte: Adaptado de Gurr & Müllhaup, 2016

4.6 Processo Aditivo com Utilização de Folhas

Abaixo será descrito o processo aditivo LOM (*Laminated Object Manufacturing*) no qual é utilizado folhas (estado sólido) como matéria-prima, as suas principais características são:

Vantagens	Desvantagens
Rápido e económico para formatos de grande dimensão	Em materiais idênticos a madeira, as peças não têm resistência suficiente e absorvem humidade
Sem necessidade de estrutura suporte	Mau acabamento superficial
	Dificuldade com as estruturas interiores e cortes
Lixar, perfurar e criar aberturas em peças semelhante a madeira	Modelos conceptuais
Vedar e pintar	Prototipagem funcional
Pirólise e impregnação com ligas de baixa fusão ou precursores cerâmicos	Protótipos metálicos, cerâmicos e materiais compósitos
Necessidades Pós-Produção	Utilizações

Figura 21 – Carecterísticas principais do processo LOM com utilização de folhas
Fonte: Adaptado de Gurr & Mülhaupt, 2016

4.6.1. LOM – Fabricação de Objeto Laminado

Este processo foi desenvolvido por Helisys em 1991, sendo que hoje em dia o maior fabricante comercial é Cubic Technologies and MCor Technologies Ltd. Esta tecnologia pode ser considerada um híbrido entre a produção aditiva e a subtrativa onde o procedimento é baseado na laminagem sequencial de folhas (2D) em que cada uma desta é cortada com os contornos do objeto.

Este processo, comparado com os anteriormente descritos, permite fabricar mais rápido e a menor custo, no entanto, a remoção do material suporte laminado pode ser bastante trabalhosa. Os cortes interiores são complexos e as estruturas ocas são difíceis de produzir a não ser que o processo seja interrompido a meio para a remoção do material interior.

O material original utilizado no LOM são folhas de papel laminado com uma camada fina de adesivo no qual resulta em peças com propriedades semelhantes à madeira. Se não forem impregnadas resinas adequadas, o material fica mais susceptível à absorção de humidade (problemas de encurvadura). Nos últimos anos, foram desenvolvidas várias soluções de materiais para utilização no processo LOM como compósitos à base de polímeros, de metais e de materiais cerâmicos.

Ao nível do processo, inicialmente a bobine de entrada desenrola o material laminado alimentando deste modo a plataforma de construção deixando o lado revestido com

adesivo orientado para baixo. Esta camada aplicada é laminada através do movimento de um rolo aquecido, colando-a assim à plataforma de construção. No passo seguinte, um laser a CO₂ corta os contornos da camada de acordo com a programação previamente realizada em CAD e as secções interiores que não fazem parte do protótipo são cortadas em pequenas fatias para serem mais fáceis de remover no final do processo. Após a realização do corte laser, a plataforma de corte desce uma distância igual à espessura de uma camada e o restante material é transportado para uma bobine de saída. A bobine de entrada volta a alimentar a plataforma de construção para que se execute um processo idêntico à primeira etapa, sucessivamente até se formar o modelo final, este é retirado da plataforma de construção e são-lhe removidas as peças aglomeradas que não o constituem.

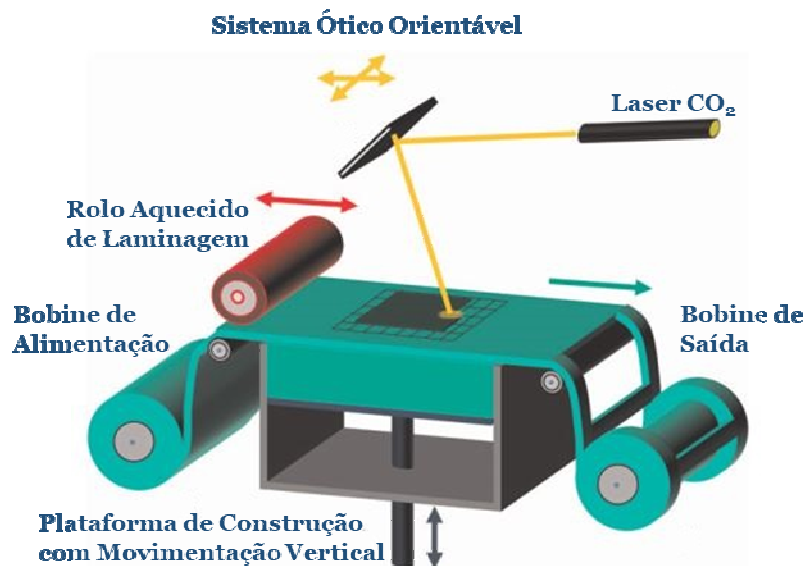


Figura 22 – Processo LOM
Fonte: Adaptado de Gurr & Mülhaupt, 2016

4.7 Prototipagem Rápida e Indústria 4.0

O processo de inovação de produtos e serviços é árduo, existindo um longo caminho de investigação e desenvolvimento, porém com o suporte das novas tecnologias que advêm da Indústria 4.0, como a simulação via realidade virtual, o caminho poderá ser encurtado. Um dos outros chavões associados à I 4.0 é a customização em massa, através desta existirão produtos mais específicos adequados às necessidades dos clientes, em que o processo de lançamento de produtos para o mercado, no qual faz parte o processo de desenvolvimento, deverá ter um *lead time* competitivo (Alcácer & Cruz-Machado, 2019).

As tecnologias de produção aditiva são apresentadas como soluções da I 4.0 para os desafios apresentados, sendo que estas vão de uma forma gradual substituir os processos de fabricação convencionais (processos subtrativos), permitindo novos produtos, novos processos, novos negócios e novas cadeias de abastecimento. As tecnologias de produção aditiva são também sinónimas de prototipagem rápida, permitindo criar protótipos para permitir a independência dos elementos da cadeia de valor, obtendo uma redução de tempo no processo de design e fabricação (Chong, Ramakrishna & Singh, 2018).

Apesar destas tecnologias de produção aditiva serem mais correlacionados com a prototipagem rápida, na qual os produtos gerados não chegam ao utilizador final e são apenas utilizados como processo de validação interno, a tendência futura é serem utilizadas como técnicas de produção rápida no sentido de aumentar os rácios de produção e diminuir os custos de produção. Além disso, estas tecnologias permitem que os produtos sejam baseados em outros existentes através do auxílio de ferramentas de design digital como os scanners 3D ou através da alteração dos modelos 3D CAD (Brettel, Klein & Friederichsen, 2015).

O ciclo de vida tradicional de um produto é composto pelas fases de desenvolvimento, introdução, crescimento, maturidade e declínio, sendo que o processo de desenvolvimento pode ser realizado de uma forma iterativa com a possibilidade de integração do produto com clientes de modo a reunir informação, onde a evolução é baseada na opinião destes. As tecnologias de produção aditiva ligadas à abordagem iterativa permitem reduzir o custo produção de um produto minimamente viável para entrar no mercado e recolher dados. A implementação do conhecimento e da experiência adquiridos no mercado através de variantes dos produtos permite ganhos em termos de engenharia e produção assim como a redução do desperdício ao mínimo. A utilização deste processo iterativo como fase de avaliação, fazendo parte integrante do ciclo de vida do produto, diminui o risco de perder as tendências de mercado e aumentar a capacidade de resposta às mudanças nas necessidades do mercado, que é claramente um dos desafios da Indústria 4.0. (Brettel, Klein & Friederichsen, 2015).

5. Proposta de Implementação de uma *Learning Factory*

Nesta secção pretende-se propor a implementação de uma L.F. na Universidade da Beira Interior, podendo afirmar-se que este tipo de projeto é algo inovador tanto a nível regional como nacional, visto não existirem muitos exemplos nacionais em plenas funções, ao contrário do que se pode verificar a nível mundial, especialmente na Alemanha. O termo anglo-saxónico projeto *Lighthouse*, refere-se a projetos modelo, que para além de serem originais, pretendem ser também orientadores e inspiradores para projetos vindouros servindo assim estes de inspiração para a proposta de implementação de uma L.F. na U.B.I., com o nome de Lighthouse Learning Factory, onde o acrónimo será U.B.I. 2L.F.

Como anteriormente mencionado, Tisch et al. (2015b) referiram que para a configuração de uma L.F., através de uma abordagem holística, existem duas transformações didáticas, onde na primeira fase são analisados os grupos alvo, os objetivos organizacionais e o ambiente organizacional, no sentido de definir quais as competências pretendidas. Baseado nos resultados obtidos na primeira fase, na seguinte são definidos os meios utilizados para o ensino e os métodos didáticos utilizados para a criação de valor na L.F.

A Indústria 4.0 trará novos desafios para a indústria e de modo a poder existir uma implementação gradual será necessário preparar os profissionais para o futuro. Conforme referido anteriormente, será requerido aos novos profissionais um pensamento interdisciplinar, e não focado apenas na sua área específica, com o intuito de terem capacidades e técnicas que permitam flexibilidade na resolução dos problemas neste novo contexto industrial. No seguimento desta premissa, pode-se definir qual o objetivo pretendido para a L.F. a implementar na U.B.I., na qual se pretende implementar uma fábrica ligada aos conceitos da Indústria 4.0 de modo a preparar os seus estudantes para o futuro, dando-lhes competências transversais.

Ao nível do grupo alvo da L.F. é de referir que esta não será apenas para servir os alunos de Engenharia e Gestão Industrial, mas deverá ser transversal a todos os outros cursos da Faculdade de Engenharia. Visto que a implementação de uma L.F. será para desenvolver um conhecimento interdisciplinar, os cursos que não pertençam à área das Engenharias também poderão beneficiar da L.F. para promoção de novos conhecimentos e de novas metodologias de ensino

Outra das análises a ser realizada na primeira transformação é o ambiente organizacional, nesse sentido é necessário avaliar qual o estado atual a nível de instalações e equipamentos disponíveis na U.B.I. Outro ponto a referir, apesar de não quantificado nos capítulos anteriores, é a perceção de que a implementação de uma L.F. é um processo moroso e envolve custos elevados, criando necessidade, muitas das vezes, de recorrer a capitais públicos (programas de financiamento) ou ao patrocínio de empresas (criação de parcerias) para alavancar o arranque do projeto. De modo a poder potencializar e viabilizar o lançamento deste projeto é necessário identificar as instalações e os equipamentos, ou seja, as oportunidades existentes na U.B.I. que poderão ser utilizadas como uma plataforma de lançamento da L.F.

No subcapítulo seguinte é apresentado o Laboratório de Fabricação da U.B.I. (FabLab), que fazendo parte integrante da Faculdade de Engenharia da U.B.I. torna-se bastante atrativo do ponto de vista de instalação suporte para o lançamento da L.F.

5.1 Descrição do FabLab|U.B.I.

Integrado no Centro para as Ciências e Tecnologias Aeroespaciais (C-MAST – Centre for Mechanical and Aerospace Science and Technologies), o FabLab é um laboratório de investigação criado em 2014 através do financiamento do Programa Operacional Regional do Centro 2007-2013 QREN – mais CENTRO e concluído no ano de 2015, representando um investimento de 600.000€ (LabCom /UBI, 2019).

O C-MAST que rege o FabLab, foi fundado em 1994 por um pequeno grupo de engenheiros aeroespaciais, sendo que neste momento é um Centro de Pesquisa que desenvolve estudos na área de engenharia Mecânica, Energia e Fluídos e Aeroespacial com um campo de investigação bastante amplo indo desde a astrodinâmica até as tecnologias de previsão, estando envolvido em colaborações internacionais, redes científicas e sociedades profissionais prestigiadas (U.B.I, 2019).

Existe também uma promoção da investigação e da colaboração com a indústria em Portugal, com o intuito de melhorar a qualidade de ensino e aprendizagem, qualificar quadros superiores e desenvolver atividades fora da Universidade. Neste momento o C-MAST tem a seu cargo mais 30 projetos (em conclusão ou em curso) sendo que um dos mais emblemáticos é o INDTECH 4.0 no valor de 9.2 M€, que tem como objetivo geral a conceção e desenvolvimento de tecnologias inovadoras no contexto da Indústria 4.0 através de parcerias entre empresas, centros de investigação, no qual está incluída a

U.B.I., onde a liderança deste projeto é realizada pelo grupo PSA em Mangualde (U.B.I, 2019).

O FabLab foi criado de modo a poder servir os membros da comunidade da U.B.I. e as unidades de investigação e desenvolvimento (I&D) sediadas na Universidade. Caso existam projetos externos, que sejam desenvolvidos em conjunto com o FabLab podem ser exercidas parcerias com entidades empresariais ou unidades I&D externas à U.B.I. Tendo em conta os destinatários do laboratório, os seus principais objetivos são (U.B.I, 2019):

- Suporte às atividades de I&D na UBI, com foco primário nas Engenharias, particularmente na Engenharia Aeronáutica, Civil e Eletromecânica, mas também nas outras áreas como a de Design Industrial;
- Apoio à investigação aplicada, especialmente em parceria com o tecido empresarial da região;
- Potenciar a relação entre as Engenharias com outras áreas de estudos na U.B.I.

5.1.1. Equipamentos FabLab|U.B.I.

A infraestrutura com os equipamentos do FabLab encontra-se dentro da Faculdade de Engenharia da U.B.I., mais precisamente no silo que é utilizado para parque de estacionamento, conforme indicado na figura 23.

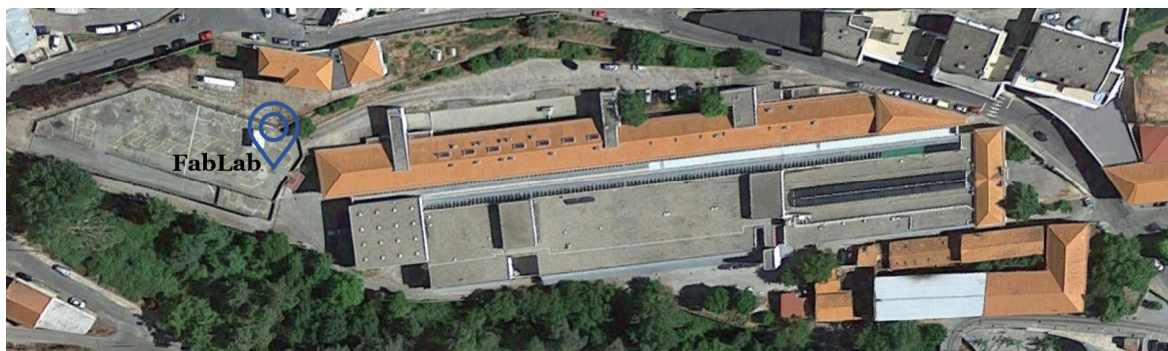


Figura 23 – Localização FabLab na Faculdade de Engenharia da U.B.I
Fonte: Adaptado de Google Maps

A nível de espaço físico, o FabLab é constituído por um hangar no qual se encontram os equipamentos principais e de maior dimensão, duas salas contíguas a este, que servem de suporte e uma sala destinada ao compressor. De acordo com a planta original (Anexo 8), o hangar tem um formato praticamente retangular com dimensões de 21,8 m por 10,75 m perfazendo uma área aproximada de 235 m². É possível também observar na planta original que existe uma zona no hangar referenciada como zona de formação com uma área de 20 m² e equipada com 15 mesas e cadeiras. Relativamente às duas salas contíguas,

uma é designada de gabinete, onde se encontra o equipamento de produção aditiva (11,5 m²), a outra é referenciada como sala de arrumos e tem 41 m².

Sendo um laboratório de fabricação, o FabLab tem na sua posse diversos equipamentos de modo a servir as necessidades requeridas pelos seus utilizadores. Tendo em conta os processos de prototipagem rápida apresentados anteriormente. Na tabela 8 são apresentados os principais equipamentos do FabLab, divididos pelo tipo de processo (aditivo ou subtrativo):

Tabela 8 – Principais máquinas do FabLab de acordo com o processo produtivo
Fonte: Elaboração própria

Máquinas de Produção Subtrativa	Máquinas de Produção Aditiva	Outras Máquinas
Centro de Máquinagem Vertical CNC	Impressora FDM	Scanner 3D
Torno CNC		Prensa de Vácuo para Termoformagem
Máquina de Corte por Jato de Água		Multi-estação de medição laser 3D
Router de 3 Eixos		
Serrote de Fita		
Engenho de Furar		

De modo a identificar qual o potencial de cada um dos equipamentos existentes no FabLab, nas tabelas 9 a 18 são apresentadas as suas respetivas características:

Tabela 9 – Centro de maquinagem vertical CNC
Fonte: Adaptado de U.B.I., 2019

Centro de Máquinagem Vertical CNC	Características		
	Marca	Litz	
	Modelo	CV-1000	
	Velocidade máxima da árvore (rpm)	12000	
	N.º de ferramentas	20	
	Dimensões da mesa (mm)	560 x 1000	
	Capacidade de carga máxima da mesa (kgf)	750	
	Curso (mm)	X	1020
		Y	560
		Z	600
	Curso (º)	B	360º
		C	-30º a 120º
	Distância Árvore – Mesa (mm)	135 - 735	
	Velocidades de avanço rápido (m/min)	x,y	24
		z	18
	Velocidade de Avanço (feed rate) (mm/min)	1 - 10000	
	Controlador CNC	Mitsubishi M70	
	Eixos B e C	Detron GF-170H	
	Medição automática de ferramentas	Renishaw TS27R	




Tabela 10 – Torno CNC
Fonte: Adaptado de U.B.I., 2019

Torno CNC	Características		
	Marca	HAAS	
	Modelo	ST-10	
	Velocidade máxima da árvore (rpm)	6000	
	N.º de posições da torreta VDI	12	
	Tempo de troca de ferramenta a ferramenta (s)	0,5	
	Dimensões da bucha (mm)	165	
	Capacidade de passagem de barra, max. (mm)	Ø 45,7	
	Curso (mm)	X	200
		Z	356
	Velocidades de avanço rápido, X, Z (m/min)	30,5	
	Potência do motor da árvore (kW)	11,2	
	Binário máximo - às 1300rpm (N.m)	102	
	Controlador CNC	HAAS	




Tabela 11 – Máquina de corte por jato de água
Fonte: Adaptado de U.B.I., 2019

Máquina de Corte por Jato de Água

Características	
Marca	Pronum
Modelo	WaterJet 3015
Área útil de Trabalho (mm x mm)	3000 x 1500
Capacidade de carga máxima da mesa (kg)	3000
Altura sob o pórtico (mm)	200
Velocidades de avanço rápido em X, Y e Z	60
Controlador CNC	Eding USB-CNC
Bomba de Água	
Marca	Hypertherm
Modelo	Hy Precision 30
Pressão (bar)	4137
Caudal máximo (lpm)	2,3
Potência (kW)	22




Tabela 12 – Router de 3 eixos
Fonte: Adaptado de U.B.I., 2019


Router de 3 Eixos	Características	
	Marca	Pronum
	Modelo	Portic 3020
	Velocidade da árvore (rpm)	24000
	Potência da fresadora (kW)	5
	Área útil de Trabalho, X, Y (mm x mm)	3000 x 2000
	Altura sob o pórtico, Z (mm)	700
	Velocidades de avanço rápido (m/min)	60
	Controlador CNC	Eding USB-CNC
		

Tabela 13 – Serrote de fita
Fonte: Adaptado de U.B.I., 2019


Serrote de Fita	Características	
	Marca	Rong Fu Industry Co.
	Modelo	RF-912B
	Peso (kg)	160
	Potência do motor (kW)	0,75
	N.º de Série do motor	JD030316
	Data de fabrico	2015 / 04
		

Tabela 14 – Engenho de Furar
Fonte: Adaptado de U.B.I., 2019


Engenho de Furar	Características	
	Marca	Rong Fu Industry Co.
	Modelo	RF-31
	Peso (kg)	270
	Data de fabrico	2015 / 04
		

Tabela 15 – Impressora 3D – FDM
Fonte: Adaptado de U.B.I., 2019

Impressora 3D - FDM	Características	
	Marca	Stratasys
	Modelo	uPrint SE
	Tecnologia de impressão	FDM
	Material de impressão	ABS plus
	Material de suporte	SR-30
	Dimensão máxima do modelo (mm)	203 x 152 x 152
	Espessura de camada (mm)	0,254
	Software de gestão da impressão	CatalystEX
	Formato dos modelos CAD 3D suportado	STL
		

Tabela 16 – Scanner 3D
Fonte: Adaptado de U.B.I., 2019

Scanner 3D	Características	
	Marca	Artec 3D
	Modelo	Spider
	Resolução 3D (mm)	0,1
	Exatidão 3D (mm)	até 0,03
	Exatidão 3D em distância	0.03% além dos 100 cm
	Fonte de luz	Díodo azul
	Distância de trabalho (m)	0,17 – 0,35
	Campo de visão - menor distância (mm)	90 x 70
	Campo de visão - maior distância (mm)	180 x 140
	Taxa de captura de frames em modo vídeo (fps)	até 7,5
	Tempo de exposição (s)	0,0005
	Velocidade de aquisição de dados (pontos/s)	até 1 000 000
	Software de aquisição e tratamento de dados	Artec Studio 10
	Dimensões (mm)	190 x 130 x 140
	Peso (kg)	0,85




Tabela 17 – Multi-Estação medição 3D
Fonte: Adaptado de U.B.I., 2019

Multi-Estação Medição 3D

Características		
Marca		Leica
Modelo		Nova MS50
Peso (kg)		7,6
Câmara telescópica - ampliação		30x
Câmara telescópica – amplitude de autofocagem (m)		1,7 - ∞
Medição angular - exatidão (mgon)		0,3
Medição de distância		
Alcance (m)		1,5 – 10 000
Exatidão mínima em distância (mm)		2 + 2 ppm
Tempo de medição (s)		1,5
Tecnologia Wave Form Digitising		Laser vermelho visível e coaxial
Dimensão do laser a 50 m (mm)		8 x 20
Digitalização: Alcance máximo (m) / Ruído a 50 m (mm)	1000 Hz	300/1,0
	250 Hz	400/0,8
	62 Hz	500/0,6
	1 Hz	1000/0,6
Captura de imagem : câmara global/telescópica		
Sensor		CMOS 5 Mpixel
Campo de visão - global/telescópica (°)		19,4/1,5
Taxa de captura de frames (frames/s)		até 20
Detecção automática de alvos (ATR)		
Distância – modo ATR (m)		1000
Exatidão (mgon)		0,3





Tabela 18 – Prensa vácuo para termoformagem
Fonte: Adaptado de U.B.I., 2019

Prensa Vácuo para Termoformagem	Características	
	Marca	Global Vacuum Presses
	Modelo	"global duo" GD-SP-2513
	Dimensões da mesa de prensagem (mm)	2500 x 1300
	Dimensões do forno de aquecimento (mm)	2500 x 1000
	Altura máxima de prensagem (mm)	400
	Pressão máxima de vácuo (ton/m ²)	9
	Caudal da bomba de vácuo (m ³ /h)	16
	Espessura da membrana de silicone (mm)	2
	Temperatura máxima de trabalho (°C)	200
	Potência (kW)	11
	Intensidade de corrente (A)	18.8
	Peso (kg)	865



De acordo com o apresentado a nível de espaço e equipamento conclui-se que o FabLab é o ambiente organizacional adequado para servir de base para a implementação da *Learning Factory*.

5.2 Seleção de Produto | Serviço

Estando definida a primeira transformação didática, no qual foram definidos o grupo alvo, o objetivo pretendido e o possível ambiente organizacional é necessário passar para a segunda fase, na qual é realizada uma configuração e estruturação técnica e didática da infraestrutura, onde um dos pontos fulcrais é a definição do produto ou serviço base da L.F.

Para a seleção do produto ou serviço base é importante também caracterizar a região onde se encontra a L.F. Sendo que no passado a Covilhã era conhecida como a “Manchester Portuguesa” em virtude do seu tecido industrial ser essencialmente constituídos por indústrias do sector dos lanifícios. porém durante o século XX viria a perder essa importância principalmente devido ao 25 de Abril e à globalização dos mercados. Hoje em dia para além da importância que tem como centro de formação, com a U.B.I., existe ainda uma diversidade nas atividades económicas principalmente nos sectores estratégicos da indústria têxtil, agroindústria, mecânica de precisão e turismo. De acordo com os dados do município, existem registadas mais de 18 empresas que originam uma atividade exportadora no valor de 200 milhões de Euros (Câmara Municipal da Covilhã, 2019).

Durante a inauguração oficial do FabLab em outubro de 2016, o Professor Hélder Correia em conferência de imprensa indicou que a implementação do laboratório poderia apoiar a investigação que é realizada na U.B.I. uma vez que os protótipos requisitados pelos projetos poderiam passar a ser realizados internamente, devido à flexibilidade que as

máquinas possuem, podendo maquinar vários tipos de materiais nomeadamente, madeira, pedra e aço. Foi também referido, que este seria uma mais-valia para as empresas e para as unidades de investigação de outras instituições de Ensino Superior, pois através de parceria podiam ser utilizados os equipamentos, até aquela altura, inexistentes na região com o intuito de desenvolver produtos no âmbito de projetos de investigação aplicada (LabCom /UBI, 2019).

De acordo com o apresentado anteriormente é perceptível que o FabLab apresenta potencial para ser utilizado como plataforma de lançamento da Learning Factory da U.B.I. devido a três fatores principais: o diminuto investimento inicial, pois já existe capacidade instalada; a rentabilização do investimento do FabLab e; a localização, pois este encontra-se dentro das instalações da Faculdade de Engenharia sob a tutela da U.B.I.

Utilizando o mote dado pelo professor Hélder Correia durante a inauguração e tendo em conta a diversidade de máquinas existentes no FabLab, o produto a selecionar como fio condutor da L.F., ao invés do tradicional produto físico, propõem-se a implementação de um serviço, no qual o processo seria o de prototipagem rápida.

Tendo em conta os equipamentos industriais existentes, para além do serviço de prototipagem rápida, que apoiará os projetos de investigação, poderá também apoiar o tecido empresarial da região com o desenvolvimento de protótipos, assim como a produção de pequenas ferramentas, peças sobresselentes, ou seja, todo o tipo de produtos possíveis de executar na L.F. e que sejam de interesse relevante para o processo de aprendizagem dos alunos.

O processo de prototipagem rápida é uma parte do ciclo de vida de um produto, mas visto que neste caso específico é o produto da L.F., este será utilizado no sentido de desenvolver produtos no âmbito de projetos específicos internos e externos, deste modo de acordo com a classificação do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP pode-se indicar que o ciclo de vida do produto da L.F. da U.B.I. seria o de desenvolvimento do produto, conceção do produto e prototipagem rápida (Tisch et al., 2015a).

Apesar de neste trabalho não estar a ser associado a esta proposta de L.F. nenhum produto, não invalida a sua introdução numa fase posterior, tal como nos exemplos apresentados de L.F. que existem em todo o mundo.

5.3 Unidades Curriculares

O processo de transformação do FabLab numa L.F. pretende potencializar os recursos existentes, mas também de criar neste espaço físico um ambiente educacional multidisciplinar, interligando as várias áreas de conhecimento, incentivando uma aprendizagem interdisciplinar e prática. Esta transformação deverá incorporar os conceitos da Indústria 4.0, assim como o mosaico tecnológico associado a este conceito, como a robotização, os processos em *cloud*, a simulação 3D de produtos, a produção aditiva, entre outros.

Sendo a prototipagem rápida o serviço base para o lançamento da L.F., numa primeira fase é mais lógico que as unidades curriculares a serem integradas nesta sejam correlacionadas com esse serviço. No processo de seleção das unidades curriculares, nesta fase apenas foram analisados os cursos de Engenharia e Gestão Industrial e de Design Industrial devido à maior proximidade com a temática. Porém conforme referenciado no início deste capítulo outros cursos poderão usufruir da L.F., tal como acontece atualmente com os cursos pertencentes ao Departamento Engenharia Eletromecânica que utiliza os serviços do FabLab para a construção de peças para os carros da prova Shell Eco-Marathon.

Nas tabelas 19 e 20 são apresentadas as unidades curriculares propostas a serem integradas na L.F., tendo sido usado como critério para a seleção das mesmas aquelas que estão relacionadas com o desenvolvimento de produto, os processos produtivos, a programação e a gestão de processos. Conforme referido acima, é pretendido criar um ambiente educacional prático, mas ao mesmo tempo interdisciplinar onde estas disciplinas poderão dar suporte a projetos de investigação internos e externos, assim como para os alunos desenvolverem o projeto final de mestrado num ambiente prático próximo à realidade de uma fábrica.

Tabela 19 – Unidades curriculares do curso de E.G.I.
Fonte: Elaboração própria

Unidade Curricular	Ciclo	Plano de Estudos
Desenho Industrial	1 ^o	Engenharia e Gestão Industrial
Ferramentas de Produtividade para Egi	1 ^o	
Tecnologias de Produção	1 ^o	
Simulação Industrial	1 ^o	
Gestão da Produção	1 ^o	
Sistemas de Informação e Bases de Dados	1 ^o	
Sistemas Mecânicos para Egi	1 ^o	
Automação e Controlo	1 ^o	
Introdução ao Projeto Industrial	1 ^o	
Tecnologias de Fabricação	2 ^o	
Gestão das Operações I	2 ^o	
Gestão das Operações II	2 ^o	
Dissertação	2 ^o	

Tabela 20 – Unidades curriculares do curso Design Industrial
Fonte: Elaboração própria

Unidade Curricular	Ciclo	Plano de Estudos
Modelação Computacional I	1 ^o	Design Industrial
Design e Metodologia de Projeto	1 ^o	
Modelação Computacional II	1 ^o	
Processos de Fabrico	1 ^o	
Design do Produto I	1 ^o	
Modelagem e Protótipos	1 ^o	
Design do Produto II	1 ^o	
Desenho Técnico e Sistemas CAD/CAM	1 ^o	
Design do Produto III	1 ^o	
Design do Produto IV	1 ^o	
Design Sustentável	1 ^o	
Gestão de Projeto e Empreendedorismo	1 ^o	
Projeto 1	2 ^o	
Modelação Avançada 3d	2 ^o	
Projeto 2	2 ^o	
Prototipagem	2 ^o	
Projeto Final, Dissertação ou Estágio	2 ^o	
Tecnologias de Fabricação	2 ^o	

5.4 Estrutura da U.B.I. 2L.F.

De uma forma generalista poder-se-ão dividir as atividades da L.F. em 2 campos distintos, o teórico e prático.

Do ponto de vista teórico, a L.F. deverá incluir as unidades curriculares selecionadas para a integrarem, lecionando os seus conteúdos programáticos, mas utilizando os projetos a decorrer na L.F. para que os alunos tenham uma experiência de ensino imersiva, facilitando o processo de aprendizagem.

A utilização de casos práticos poderá abordar diversas temáticas como o design de produto, a modelação computacional, a gestão de operações, as tecnologias de fabricação entre outras. Os casos abordados durante as aulas poderão também servir de debate de ideias e procura de soluções de forma a apoiar os projetos internos da L.F., permitindo deste modo um fluxo de ideias em dois sentidos.

A parte prática da L.F. poderá dividir-se em duas subáreas, a de design e a de produção, onde na primeira é realizada toda a definição do produto a ser produzido, incluindo a identificação das necessidades, a formulação do conceito e a fase de desenvolvimento, incluindo atividades como o desenho manual e digital, a maquetagem e a modelação 3D. É pretendido que as unidades curriculares relacionadas com a temática utilizem os trabalhos práticos alinhados com os projetos em curso na L.F., de modo a que os alunos suportem o desenvolvimento dos projetos e tenham uma experiência de aprendizagem baseada em casos práticos.

Relativamente à subárea da produção, refere-se ao processo de produção ou prototipagem utilizando o equipamento existente no FabLab, onde as unidades curriculares, especialmente as de projeto, deverão estar alinhadas com os projetos de investigação do departamento, de modo a que os alunos materializem no laboratório de fabricação, os produtos. Não é pretendido apenas, que os alunos aprendam como utilizar as máquinas disponíveis, mas também que utilizem todos os conceitos lecionados nas unidades curriculares e que são utilizados na indústria atual, especialmente os relacionados com a I 4.0.

Tendo em conta o apresentado nos parágrafos anteriores, a nível de espaço físico, numa primeira análise, as atividades da L.F. poderão ser divididas do seguinte modo:

- Aulas Teóricas – Salas de aula convencionais preparadas com equipamento didático para exposição dos conteúdos programáticos;

- Design de Produto – Salas de desenho assistido por computador (CAD) equipadas com 45 postos de trabalho com software necessário para o desenvolvimento dos produtos;
- Produção – FabLab equipado com máquinas de produção aditiva e subtrativa.

5.4.1. Dimensionamento da Capacidade

Para que seja definido o modo de utilização das infraestruturas, equipamentos, ou até das possíveis necessidades de aquisição de mais meios é necessário calcular o número máximo de utentes a utilizar a U.B.I .2L.F.

Conforme indicado anteriormente, a implementação desta L.F. tem como âmbito poder servir toda a comunidade da U.B.I. e possivelmente empresas externas, porém de modo a poder dimensionar o número máximo, em simultâneo, de utentes a utilizar os serviços, o foco estará nos alunos de Engenharia e Gestão Industrial e de Design Industrial. Baseado no número de vagas existentes no ano de 2019, poderá ser definido como 35, o número máximo de alunos a frequentar a L.F. em simultâneo, visto que este número consegue abranger os 4 cursos principais. O número nominal de alunos será difícil de prever, tendo em conta o número de alunos que poderão repetir as U.C. ou devido ao absentismo dos alunos na frequência destas.

Tabela 21 – Numero de vagas anuais em 2019 por curso alvo
Fonte: Elaboração Própria

Curso	Vagas Anuais
Design Industrial 1º Ciclo	35
Engenharia e Gestão Industrial 1º Ciclo	22
Design Industrial 2º Ciclo	20
Engenharia e Gestão Industrial 2º Ciclo	33

Analisando este número proposto como capacidade máxima e sabendo que neste momento as unidades curriculares sem estarem interligadas a uma L.F. funcionam corretamente, pode-se afirmar que as salas para as aulas teóricas e de design de produto conseguem absorver esta capacidade máxima.

Relativamente ao espaço a ser utilizado para produção na L.F., o atual FabLab, a sua capacidade máxima pode ser calculada em função das diretrizes da Direcção-Geral do Ensino Superior (DGES). A DGES indica que a capacidade máxima de um espaço é calculada em função da sua tipologia, ou seja, se este espaço é uma sala de aula teórica, um anfiteatro de ensino, uma sala de informática ou um laboratório de ensino. A fórmula que determina esta capacidade é a seguinte (DGES, 2020):

(i) Capacidade Máxima = Número de Lugares Existentes \times Taxa de Utilização \times Taxa de Ocupação

O número de lugares existentes é calculado atribuindo a cada ocupante uma determinada área em função do tipo de utilização, que para laboratórios esse valor é de 3 m² por aluno. Para o cálculo efetivo tem-se em conta a área útil do espaço. É de referir ainda, que para outros espaços de ensino prático a área por aluno deve ser analisada caso a caso. Neste caso concreto será utilizado por defeito o valor para laboratórios, deste modo e analisando simultaneamente a planta do FabLab e retirando todo o equipamento existente, sabe-se que área útil é aproximadamente 175 m² o que perfaz deste modo 59 o número máximo de lugares.

A taxa de utilização estabelece em termos médios, a relação entre o número de horas em que um espaço é utilizado e o número máximo de horas em que o poderia ser, de acordo com a sua tipologia, que para laboratórios o valor é 0,75.

A taxa de ocupação estabelece, em termos médios, a relação entre o número de lugares ocupados e o número de lugares existente de um espaço, de acordo com a sua tipologia, com relação a laboratórios o valor é de 0,8.

Tendo em conta os valores apresentados pode-se indicar que capacidade máxima do laboratório de fabricação é:

(ii) Capacidade Máxima = $59 \times 0,75 \times 0,80 = 35$ Alunos

Analisando a capacidade máxima calculada, pode-se concluir que uma turma de 35 alunos pode utilizar em simultâneo o laboratório de fabricação para atividades de produção.

Denota-se algumas limitações no número apresentado para a capacidade máxima, por exemplo, a zona existente para formação apenas tem 15 lugares, uma unidade curricular com a capacidade máxima que esteja a utilizar a zona de produção não terá lugares suficientes para os alunos poderem receber alguma formação suporte do docente ou até poderem trabalhar na sua secretária, sendo que deste modo é necessário dividir em diferentes turnos as turmas. Outra questão importante, refere-se à utilização das máquinas, que apesar da capacidade máxima do espaço ser de 35 alunos, as máquinas pelas suas restrições de espaço e de segurança, terão de ser utilizadas em simultâneo por um número bastante reduzido de alunos.

5.4.2. Calendarização

A utilização dos espaços das aulas teóricas deverá ser alocada às respetivas unidades curriculares, e definida aquando a preconização dos horários escolar conforme ocorre atualmente.

No que concerne ao espaço utilizado para design de produto, se as atividades nas salas de desenho assistido por computador (CAD) ocorrerem no âmbito das unidades curriculares, de acordo com o que acontece atualmente, a ocupação do espaço deverá ficar definida de acordo com o calendário escolar. Se for necessário realizar atividades que não possam ser abrangidas nas unidades curriculares, por exemplo ao abrigo do trabalho final de mestrado, esse espaço deverá ser utilizado nos períodos livres e em consonância com o coordenador do espaço, recorrendo a uma marcação prévia (utilizando o agendamento do Outlook ou de outro software similar).

Relativamente ao espaço de produção, devido à capacidade máxima da zona formação do espaço de produção, a gestão do espaço deverá ser realizada com especial atenção. A DGES indica que um período standard de funcionamento de um espaço são 40 horas semanais, apesar de atualmente os técnicos da U.B.I. trabalham 35 horas, porém para efeitos de calculo será utilizado o valor da DGES, deste modo, sabendo que a taxa de utilização para um espaço laboratorial é de 0,75, portanto deverá ter uma ocupação média 30 horas, ou seja, se as unidades curriculares utilizarem 2 horas por bloco de aula, poder-se indicar que existem disponíveis 15 blocos de aulas semanais neste espaço de produção.

Se a turma tiver a capacidade máxima estipulada anteriormente, 35 alunos, a utilização do espaço terá de ser através de turnos, o que trará uma maior redução de horas disponíveis no espaço, deste modo sugere-se que a utilização do espaço seja realizada através de uma marcação prévia, devendo ser o coordenador deste espaço a gerir.

5.4.3. Corpo Técnico

Na L.F. as áreas de design e produção requerem um suporte para além do fornecido pelos docentes das unidades curriculares, nesse sentido é necessário constituir um corpo técnico que consiga dar o apoio requerido. Dos dois espaços a coordenar é perceptível que a área de produção, o atual FabLab, tenha uma maior necessidade de suporte devido às diferentes máquinas existentes, nesse sentido é necessário que o corpo técnico tenha diferentes valências técnicas na programação dos softwares das máquinas de produção aditiva e subtrativa, assim como na operação destas de modo a formar e apoiar os alunos. Por outro lado, o espaço de design também requer suporte na utilização de softwares de desenho,

modelagem e simulação 3D que servirão para criar o modelo virtual dos protótipos a serem fabricados.

Devido aos requisitos apresentados acima é perceptível, que é necessário um docente para cada uma das áreas (design e produção) ou dois docentes que tenham experiência e conhecimento em ambas (ANQEP, 2020).

- Produção:
 - Ambiente, Higiene e Segurança Industrial;
 - Normas e Qualidade;
 - Manutenção Industrial;
 - Desenho Técnico;
 - Tecnologia e Propriedades dos Materiais;
 - Metrologia Dimensional;
 - Automatismos Industriais – Pneumática, Eletricidade, Hidráulica;
 - Softwares CAD/CAM;
 - Programação e Operação de Máquinas CNC;
 - Organização e Preparação de Trabalho;
 - Fresagem;
 - Torneamento;
 - Retificação.
- Design:
 - Processos Técnicos de Prototipagem;
 - Tecnologia e Propriedades dos Materiais;
 - Softwares CAD/CAM (SketchUp, Solidworks, Inventor, Catia, 3DS Max, Rhino, etc);

Para além desta equipa técnica deverá existir um coordenador da U.B.I.2L.F., que será o pivot deste espaço, realizando a ponte entre os utilizadores e a equipa técnica. Será o responsável pela coordenação da ocupação do espaço, sempre com o intuito de otimizar o investimento e promovendo a cultura de entreajuda, de modo a que exista uma adesão das unidades curriculares, pois só assim se conseguirá o desenvolvimento dos projetos da L.F.

5.5 Propostas de Melhoria e Modificação de *Layout*

A transformação do FabLab com o intuito de ser o espaço de produção da U.B.I.2L.F. tem como finalidade potencializar o espaço e minimizar o investimento inicial na criação de uma L.F. na U.B.I., neste sentido nas seções seguintes são apresentadas algumas

propostas de melhorias no *layout* do FabLab, sempre na ótica de investimento reduzido e usufruindo das potencialidades existentes.

5.5.1. 1ª Proposta de Modificação – Alteração Espaço de Formação

O primeiro ponto que se pode observar na planta original (figura 24) é que o espaçamento entre as máquinas é grande, sobrando poucas zonas livres, especialmente na parte inferior do hangar junto ao local dedicado à formação. Por outro lado, é de referir que as máquinas que se encontram na zona superior do hangar são pesadas e difíceis de serem movimentarem, quando comparadas com outras que se encontram na zona inferior (serrote de fita, engenho de furar). É também de denotar que com a alteração do layout das máquinas poderá ser necessário alterar as redes de abastecimento de energia destas (elétrica, pneumática, hidráulica).



Figura 24 – *Layout* original do hangar
Fonte: Elaboração própria

Conforme referenciado anteriormente, o espaço de formação existente tem lugar apenas para 15 alunos num formato *open space*, deste modo caso a turma tenha a capacidade máxima (35 alunos) é necessário dividi-la em 3 turnos. Ao nível de espaço para a utilização por parte dos alunos existe outro problema, pois caso esteja uma turma a utilizar a zona de produção, não existe espaço para que os alunos de outra unidade curricular possam lá permanecer ao mesmo tempo, especialmente o que estão a realizar o trabalho final de mestrado.

A primeira proposta de modificação do *layout* (figura 25) passa por duas alterações na zona inferior do hangar. Primeiramente, seria necessário reorganizar a posição das máquinas na zona inferior, não alterando a prensa de vácuo visto estar bem posicionada, seria apenas movido o engenho de furar e o serrote de fita, pois são fáceis de movimentar e de ligar á fonte de energia. De notar, que é necessário que estas modificações de *layout* respeitem a Portaria n.º 53/71 de 3/2 com as alterações introduzidas pela Portaria n.º 702/80 de 22/9. , como por exemplo o ponto 4 do artigo 10º (vias de passagem e saída) da Portaria n.º 53/71 de 3/2, institui que os intervalos entre as máquinas, instalações ou materiais devem ter uma largura de, pelo menos, 0,6 metros. Para além disso, no ponto 1 do mesmo artigo é referido que a largura da superfície de circulação e das saídas deve ser suficiente, mas nunca podendo ser inferiores a 1,2 metros quando o número de utilizadores não ultrapasse os 50 (Portaria n.º 53/71 de 3/2, 1971).



Figura 25 – Proposta para 1ª alteração ao *layout* original do hangar
Fonte: Elaboração própria

Com a reorganização das máquinas consegue-se libertar espaço para a implementação da segunda modificação (figura 26), que passa por remodelar o espaço de formação. Este espaço, ao contrário do que acontece na planta original, não será em modo *open space*, com intuito que exista uma barreira acústica. Por outro lado, recomenda-se que as divisórias sejam transparentes para exista uma visualização constante por parte dos utentes do espaço produtivo, deste modo propõe-se a construção de um sistema de divisória composta por uma estrutura em alumínio e vidro.

Visto que o espaço de formação será praticamente dedicado aos alunos das unidades curriculares, deverá existir um segundo espaço fechado para os outros alunos, que estejam a realizar trabalhos no espaço de produção, tal como o trabalho final de mestrado.

Com o rearranjo na localização das máquinas, libertar-se-á um espaço com 11 m de comprimento por 4m de largura para a implementação dos dois espaços de formação. Para o primeiro espaço, tendo em conta as dimensões *standards* para as mesas de 0,75 x 0,6 m e para cadeiras de 0,33 x 0,34 m, poderá ser instalado um espaço com 30 m² para 20 alunos e para um docente. No segundo espaço, visto que a área livre será menor após a implementação do primeiro, poderá ser implementado um espaço com 12,5 m² para 8 alunos com 2 mesas redondas com 1,2m e 0,9m de diâmetro de modo a otimizar o espaço, podendo ainda esta sala ser utilizada como uma sala de reuniões.



Figura 26 – Proposta para a 2ª Alteração ao *layout* do hangar
Fonte: Elaboração própria

Ao nível do equipamento didático, as salas deverão ser equipadas com sistemas para a exposição dos conteúdos, tal como um projetor, um ecrã de projeção, um sistema de som, *dock stations* para conexão dos computadores, etc.

5.5.2. 2ª Proposta de Modificação – Alteração do Gabinete

Aquando a definição do corpo técnico ficou previsto, que serão necessárias 3 pessoas para o bom funcionamento da L.F., para isso será necessário alterar as condições existentes no gabinete para uma boa laboração dessa equipa. Sendo este espaço exclusivamente para planeamento e gestão das atividades da U.B.I.2L.F. não deverá conter equipamento de produção. Neste sentido, deverá ser removida dessa sala a impressora FDM. Analisando o

mobiliário existente, apenas existem dois conjuntos de secretárias e cadeiras, deste modo deverá ser adquirido mais um e realinhar a distribuição, conforme ilustrado na figura 27

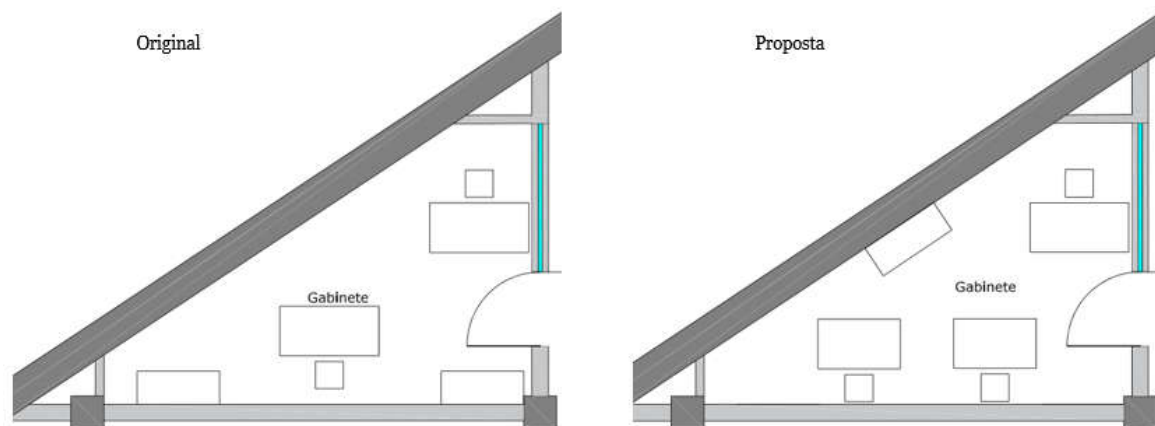


Figura 27 – Proposta de alteração do *layout* do gabinete
Fonte: Elaboração própria

5.5.3. 3ª Proposta de Modificação – De Arrumos para Espaço de Produção Aditiva

No FabLab existe uma sala designada para arrumos com uma área de 41 m², e visto que no ponto anterior é proposta a retirada da impressora FDM, a 3ª proposta de modificação passa por instalar dentro desta sala o equipamento de produção aditiva.

Devido a ser uma sala isolada com separação física, relativamente ao hangar, esta sala tem o potencial para se tornar num espaço dedicado à produção aditiva, criando uma área limpa (*cleanroom*) e com menores interferências de resíduos provenientes do hangar. É de notar, que os processos de produção aditiva libertam partículas, por exemplo o processo FDM (equipamento existente) dependente do material utilizado, podendo libertar estireno, butanol, cicloexanona, etilbenzeno, por isso é recomendado a instalação de filtros HEPA (*High Efficiency Particulate Arrestance*) nas impressoras para aspirar as partículas com dimensões superiores a 0,3 µm, porém para partículas de tamanho inferior é recomendado a utilização de um sistema de tratamento de ar por fotocatalise (Wojtyła, Klama, & Baran, 2017).

Criando um espaço dedicado à produção aditiva, e visto existir uma área livre considerável (41 m²), existe potencial para que no futuro se faça um investimento em outros processos de produção aditiva, tais como os indicados anteriormente na revisão bibliográfica, de modo a diversificar as soluções existente na U.B.I.2L.F.

5.5.4. 4ª Proposta de Modificação – Implementação de Metrologia Dimensional

Neste trabalho é proposto como serviço base da L.F. a prototipagem rápida, e a aplicação deste serviço é apoiada nos processos de design e produção quer seja subtrativa ou aditiva. Para além destes processos, existe a necessidade de um terceiro serviço, que se pode afirmar como igualmente necessário, designado de metrologia dimensional.

A metrologia é a ciência da medição e as suas aplicações, na qual se englobam todos os aspetos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação, onde por sua vez a metrologia dimensional é o domínio específico dos conhecimentos relativos à medição de comprimentos, ângulos e estados de superfície. O controlo dimensional é um método importante para que ocorra a verificação, a validação e a calibração de características de objetos, estruturas ou mesmo de equipamentos (VIM, 2012).

Com a produção de protótipos, quer seja por equipamentos de produção aditiva ou subtrativa, existe uma necessidade de validar as características geométricas definidas na fase de design, para isso deverão existir equipamentos para realizar essa tarefa. Neste momento existe no FabLab alguns equipamentos que podem ser utilizados na L.F., porém devido à quantidade de alunos e visto terem um custo baixo de investimento, deverão ser adquiridas mais quantidade de:

- Réguas Graduadas;
- Paquímetros;
- Micrómetros;
- Suta Universal.

Este tipo de equipamentos permitirá realizar uma validação simplista aos protótipos produzidos, porém para os casos em que a precisão seja fundamental a solução passará por enviar para um laboratório de medição externo ou pela aquisição de equipamentos mais complexos, como por exemplo uma máquina de medição por coordenadas (Coordinate-measuring machine - CMM). Existindo diversas soluções que variam em dimensão, complexidade e preço, sugere-se a aquisição de um braço de medição portátil com apalpador rígido e digitalização laser, que devido à sua versatilidade e portabilidade será uma mais valia para a L.F., no entanto o seu preço varia entre os 20.000 € e os 50.000€.

Em relação à localização para a implementação do equipamento referido anteriormente, a proposta seria utilizar a mesma zona que foi recomendada para colocar o equipamento de produção aditiva, ou seja, a atual sala de arrumos.

5.6 Notas Conclusivas e Definição da L.F.

As propostas apresentadas são apenas uma visão macro e acima de tudo uma sugestão para o caminho que poderá ser feito para que se possa transformar os espaços com potencial da Universidade da Beira Interior numa *Learning Factory*. Neste trabalho não é apresentado um plano de investimentos, deste modo não foram quantificados os custos para as alterações propostas, apenas são apresentadas de uma forma qualitativa sugestões para que se possam realizar alterações à estrutura existente, podendo num futuro este trabalho ser utilizado como base para o lançamento da *Learning Factory*.

Ao nível de cursos sugeridos para estarem conectados à L.F., a escolha recaiu nos dois ciclos de Engenharia e Gestão Industrial e de Design Industrial, principalmente devido ao tipo de serviço que foi escolhido como base para a L.F., o serviço de prototipagem rápida. Contudo uma L.F. deverá ser ágil conforme a evolução do ensino assim o requer, nesse sentido se no futuro a escolha passar por um outro serviço ou um produto específico, deverão existir opções diferentes, não só relativamente aos cursos escolhidos, mas também para a seleção do espaço a transformar, *layout*, equipamento, equipa técnica, unidades curriculares, etc.

Conforme efetuado anteriormente, aquando a classificação dos diversos exemplos de L.F. existentes no mundo e tendo em conta as propostas apresentadas ao longo deste capítulo será apresentada uma tabela resumo (tabela 22) com as características e atributos da U.B.I.2L.F. de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP (Tisch et al., 2015a).

Tabela 22 – Morfologias da U.B.I. 2L.F. de acordo com o modelo descritivo multidimensional do CWG CIRP
Fonte: Elaboração própria

2.1	Propósito Principal	Ensino			Treino		Investigação					
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Testes / Piloto			Produção Industrial		Transferência de Inovação		Imagem Pública			
3.1	Ciclo de Vida Produto	Desenvolvimento Produto		Planeamento Produto	Prototipagem	Manufaturaçã	Assemblagem	Logística	Reciclagem		Serviço	
3.2	Ciclo de Vida Fábrica	Conceito Fábrica	Plano Investimento	Planeamento Processo	Ramp-Up				Reciclagem		Manutenção	
3.3	Ciclo de Vida Pedido	Configuração & Pedido	Sequencia Pedido	Planeamento e Marcação					Recolha, Embalagem		Expedição	
3.4	Ciclo de Vida Tecnológico	Planeamento	Desenvolvimento	Testes virtuais					Modernização		Manutenção	
3.5	Funções Indiretas	Atividades Primárias					Atividades Secundárias					
		Logística Fluxo Entrada e Saída			Marketing & Vendas	Serviço		Instalações	HR	Inovação Tecnológica	Procurement	
4.1	Ambiente de Aprendizagem	Puramente Físico (Planeamento e Execução)		L.F. Física com Suporte Digital	Fluxo Físico da L.F. estendido a Virtual		Puramente Virtual (Planeamento e Execução)					
4.2	Escala do Ambiente	À Escala					Tamanho Real					
5.1	Materialidade	Material (Produto Físico)					Imaterial (Serviço)					

6. Conclusões

O setor industrial tem um papel importante nas economias dos países, por exemplo, na Europa este representa 21% do PIB de um país, consequentemente a evolução deste setor tem um efeito direto nas sociedades e nos próprios indivíduos. Em sentido inverso, os cidadãos são um ativo das economias, pois quanto maior o seu grau de formação, maior será a evolução económica a longo prazo das nações (Jovane, Westkämpe & Williams, 2009).

As mudanças climáticas, a escassez de recursos e as alterações demográficas, são fatores externos que têm pressionado as sociedades e naturalmente a indústria para uma mudança, de modo a esta ser mais sustentável do ponto de vista ecológico, económico e social, trazendo reptos adicionais aos que fomos confrontados ao longo dos anos, em que o desenvolvimento industrial de processos e máquinas era em prol do cumprimento de metas como o custo, a qualidade e o tempo. A indústria precisa de se adaptar rapidamente às novas tendências mundiais, nas quais os mercados estão em constante mudança, o ciclo de vida dos produtos é mais curto e a instabilidade é maior, para isso é necessário um salto tecnológico para a Indústria 4.0 e apoiar a indústria nestes desafios (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

Durante a pesquisa bibliográfica para a elaboração desta dissertação, foi possível verificar que o conceito da Indústria 4.0 ainda não apresenta um consenso geral no que respeita à sua definição, desenvolvimentos tecnológicos associados assim como os impactos que esta terá, mas mesmo assim encontram-se conceitos que são transversais à maioria dos artigos. Esta revolução é caracterizada por avanços tecnológicos disruptivos que derrubam as barreiras entre o mundo virtual e o físico, onde através de dois condutores principais, os CPS e a IoT, será possível interligar os trabalhadores, os sistemas de produção e processos, as máquinas inteligentes, as fábricas inteligentes e os produtos inteligentes (Pereira & Romero, 2017).

As empresas industriais têm migrado no sentido da Indústria 4.0, a ritmos diferentes consoante a sua dimensão a capacidade financeira, no sentido de alcançar uma maior eficácia e competitividade nos seus negócios, pois este paradigma possui um enorme potencial que para além do sector pode ter impacto noutros campos, como nos produtos e serviços, modelos de negócio e desenvolvimento de mercado, economia, ambiente de trabalho e até no próprio desenvolvimento das capacidades dos trabalhadores. Torna-se perceptível a importância da Indústria 4.0, se olharmos para as diversas iniciativas e

estratégias que os governos de diversos países mundiais, especialmente do G7, têm promovido no sentido de não perder a linha da frente (Liao et al, 2017).

Sendo inegável a importância da Indústria 4.0, será necessário desenvolver novas competências nos profissionais do futuro introduzindo as últimas tendências da indústria no ensino, na investigação e educação nas diferentes áreas da engenharia (Baena et al., 2017). Ao nível das competências exigidas para os novos formandos, de uma forma general durante a revisão bibliográfica é perceptível que estes terão de adquirir competências transversais, com uma grande aposta nas STEM, ao invés de formações em áreas específicas, pois é previsto que dentro de 10 anos, 10 a 15% dos empregos atuais da indústria serão extintos (CIP, 2017).

Uma das limitações durante o desenvolvimento do presente trabalho foi a extrapolação de quais as tecnologias associadas à Indústria 4.0 que deveriam ser implementadas numa possível L.F., pois analisando realisticamente a maior parte destas requer um nível elevado de maturidade da estrutura, como por exemplo a implementação de CPS ou sistemas digitais de integração horizontal e vertical. O impacto económico também dificultou a escolha, pois mesmo que existisse um orçamento alocado à L.F. é perceptível que integração de tecnologias como a análise de *Big Data*, Nanotecnologias, Inteligências Artificial e Máquinas Cognitivas têm custos elevados que podem não ser compatíveis com uma estrutura de ensino.

Após a análise das estruturas e equipamentos existentes na Universidade da Beira Interior, foi perceptível que o FabLab é uma instalação com o potencial para ser transformado numa L.F. e tendo em conta o equipamento existente, tornou-se sugestivo utilizar este espaço para o serviço de prototipagem rápida com foco na produção aditiva, apesar de neste momento apenas existir um equipamento.

A produção aditiva é considerada uma das tecnologias disruptivas da I. 4.0, onde apesar das suas desvantagens ao nível da velocidade, precisão, repetibilidade e custo de fabricação comparado com as tecnologias tradicionais, apresenta uma supremacia quando os requisitos dos produtos são mais complexos e personalizados, num mercado que tende no futuro a ter lotes de produção mais pequenos e produtos com ciclos de vida mais curtos. Hoje em dia, já existem diversas soluções no mercado ao nível desta tecnologia, com custo variado, e uma grande variedade de matérias primas passíveis de serem utilizadas, tentando colmatar as deficiências existentes, como por exemplo a resistência dos materiais, tornando possível desenvolver produtos em diversas escalas, materiais e funcionalidades (Dilberoglu, Gharehpapagh, Yaman & Dolen, 2017).

A escolha da produção aditiva, como serviço base da L.F. está alinhada com o tipo de perfil que é requerido para um futuro profissional da Indústria, pois durante o desenvolvimento de protótipos serão estimuladas competências transversais como as de gestão, planeamento, design ou programação. Tendo em conta as razões anteriormente apresentadas, a seleção desta temática como serviço para a L.F. parece ser adequada pois interliga de uma forma apropriada as temáticas da Indústria 4.0 e das *Learning Factories*.

Do ponto de vista académico, tal como a temática Indústria 4.0, o número de artigos publicados relativamente às *Learning Factories* cresceu de uma forma significativa nos últimos anos, existindo uma tendência transversal durante a revisão bibliográfica que vem dar um aporte ao ensino, colmatando as falhas do sistema tradicional, permitindo aos alunos ter uma discência mais experimental, com conhecimentos transversais e com incentivo à criatividade e ao espírito crítico, tornando-se uma excelente plataforma de transferência de conhecimento e competência, quer seja para a formação, o treino ou até para a investigação a nível académico e industrial (Abele et al.,2015).

Apesar de ser uma temática recente, denota-se que existe um grande esforço por parte da comunidade académica para encontrar uma definição consensual e sistemas classificativos para as L.F., onde o Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP se apresenta como o mais completo, contendo 7 dimensões, 59 características e os seus respetivos atributos (Tisch et al., 2015a). Desde 2007, após a implementação da primeira L.F. da era moderna, o número de L.F. cresceu bastante a nível mundial, demonstrando a importância deste modelo de ensino e dando ênfase à possível implementação de uma L.F. na Universidade da Beira Interior (Abele, Metternich & Tisch, 2019).

Suportada pela bibliografia revista e pelos exemplos de L.F. internacionais foi apresentada neste trabalho uma proposta para a criação da U.B.I. 2L.F., através de um processo de transformação do FabLab, de uma forma qualitativa, sendo sugerido o serviço base, os cursos e unidades curriculares que poderão ter uma melhor interação com a L.F., o corpo técnico, a capacidade de utilização, os procedimentos de calendarização e ainda foram expostas algumas sugestões de melhoria e alteração ao *layout* do FabLab no sentido de o adaptar à realidade de uma L.F..

Esta proposta poderá ser considerada com um primeiro passo para a implementação de uma L.F. na U.B.I., surgindo como uma recomendação fundamentada numa revisão bibliográfica, não sendo possível dissociar de um futuro estudo quantitativo, associado a um plano de negócios, pois uma estrutura de uma L.F. deverá ter um processo de

implementação idêntico ao de uma empresa, pois as suas operações deverão ser autossustentáveis.

Todavia, se forem seguidas as recomendações apresentadas neste trabalho, a L.F., conforme a sua própria definição, deverá ser uma estrutura de ensino flexível, podendo sempre num futuro ser adaptada a outros cursos, unidades curriculares, produtos ou serviços, com equipamento diferente, mas sempre com o foco na didática de modo a preparar os seus discentes para um futuro disruptivo.

Referências Bibliográficas

- 3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days. (2019). Retirado <https://www.3dhubs.com> – Acedido a 03/07/2020
- Abele, E., Bechtloff, S., Cachay, J., & Tenberg, R. (2012) Lernfabriken einer neuen Generation: Entwicklung einer Systematik zur effizienten Gestaltung von Lernfabriken. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 107(3):147–151. Retirado de <https://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/104.110716> - Acedido a 22/02/2019
- Abele, E., Metternich, J., Tisch, M., Chryssolouris, G., Sihn, W., ElMaraghy, H., Hummel, V., & Ranz, F. (2015) Learning Factories for Research, Education, and Training. *Presentation of the Key Note at the 5th Conference on Learning Factories*, 8 July. Retirado <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.187> - Acedido a 27/01/2019
- Abele, E., Metternich, J., & Tisch M. (2019) Learning Factories Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples. Springer Nature Switzerland AG 2019 ISBN 978-3-319-92260-7 ISBN 978-3-319-92261-4 (eBook) Retirado de <https://doi.org/10.1007/978-3-319-92261-4> - Acedido a 06/04/2019
- Abele, E., Tenberg, R., Wennemer, J. & Cachay, J. (2010) Kompetenzentwicklung in Lernfabriken für die Produktion. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) 105(10):909–913 Retirado de <https://www.hanser-elibrary.com/doi/abs/10.3139/104.110415> - Acedido a 18/03/2019
- Abele, E., & Reinhart, G. (2011). Zukunft der Produktion. München: Hanser, Carl. ISBN 978-3-446-42805-8 (Ebook) Retirado de <https://www.hanser-elibrary.com/isbn/9783446425958?mobileUi=0> – Acedido a 12/05/2020
- Alcácer, V. & Cruz-Machado, V. (2019) Scanning the Industry 4.0: A Literature Review on Technologies for Manufacturing Systems. Engineering Science and Technology, an International Journal. PP.899-919. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2019.01.006> - Acedido: 05/09/2019
- All3DP.com. (2019). Retirado de <https://all3dp.com> - Acedido a 03/07/2019
- Alptekin, S.E., Pouraghabagher, R., McQuaid P., & Waldorf, D. (2001) Teaching Factory, American Society for Engineering Education: 1–8. Retirado de

https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://scholar.google.pt/&httpsredir=1&article=1016&context=ime_fac - Acedido a 22/02/2019

ANQEP (2020). Referencial de Formação - Formação Tecnológica - 521043 Operador/a de Máquinas Ferramentas [Ebook]. ANQEP. Retirado de http://www.catalogo.anqep.gov.pt/PDF/QualificacaoReferencialPDF/1932/EFA/tecnologica/521043_RefTec - Acedido a 10/04/2020

Atzori, L., Iera, A. & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A Survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. Retirado de https://www.researchgate.net/publication/222571757_The_Internet_of_Things_A_Survey - Acedido a 15/04/2018

Baena, F., Guarín, A., Mora, J., Sauza, J., & Retat, S. (2017). Learning Factory: The Path to Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 9, 73-80. doi: 10.1016/j.promfg.2017.04.022 Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917301403> - Acedido a 14/05/2020

Belvedere, V., Grando, G., & Bielli, P. (2013). A Quantitative Investigation of the Role of Information and Communication Technologies in the Implementation of a Product-service System. *International Journal of Production Research*. 51(2), 410–426. Retirado de <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00207543.2011.648278?needAccess=true> – Acedido a 20/02/2018

Brettel, M., Klein, M. & Friederichsen, N. (2015). The relevance of manufacturing flexibility in the context of Industrie 4.0. 48th CIRP Conference on MANUFACTURING SYSTEMS - CIRP CMS. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.12.047> - Acedido: 05/09/2019

Cachay, J., Wennemer, J., Abele, E., & Tenberg, R. (2012) Study on Action-Oriented Learning with a Learning Factory Approach. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*. Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812040700> - Acedido a 27/01/2019

Cardoso, J., Voigt, K. & Winkler, M. (2008). Service Engineering for the Internet of Services. In J: Filipe & J. Cordeiro (Eds) *International Conference on Enterprise*

- Information Systems* (pp. 15–27). Retirado de <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-00670-8.pdf> - Acedido a 15/04/2018
- Câmara Municipal da Covilhã (2019). Retirado de <http://www.cm-covilha.pt/?cix=876&tab=794&curr=856&lang=1> – Acedido a 26 January 2020
- CEDEFOP. (2010) Skills Supply and Demand in Europe: Medium-Term Forecast up to 2020, Publications Office of the European Union, Luxembourg. Retirado de <https://www.voced.edu.au/content/ngv%3A44300> - Acedido a 09/01/2019
- Chryssolouris, G., Mavrikios, D., & Mourtzis, D. (2013) Manufacturing Systems— Skills & Competencies for the Future. 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 7: 17-24. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.05.004> - Acedido a 27/01/2019
- Chong, L., Ramakrishna, S. & Singh, S. (2018). A Review of Digital Manufacturing-based Hybrid Additive Manufacturing Processes, *Int. J. Adv. Manuf Technol* 95. pp. 2281–2300, Retirado de <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1345-3>. – Acedido a 05/09/2019
- CIP. (2017). O Conceito de Reindustrialização Indústria 4.0 e Política Industrial para o Século XXI - O caso Portugues [Ebook]. Lisboa: Confederação Empresarial de Portugal (CIP). Retirado de http://cip.org.pt/wp-content/uploads/2017/12/Conselho_Industria_Portuguesa_final-LR.pdf – Acedido a 19/02/2018
- Comissão Europeia. (2017). *Digital Transformation Monitor, Germany: Industrie 4.0*” [PDF]. Retirado <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/monitor/content/germany-industrie-40> - Acedido a 24/02/2018
- Delloite. (2015). *Industry 4.0: Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies* [PDF]. Retirado de <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/c-h-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf>- Acedido a 22/02/2018
- DGES. (2020). Cálculo da capacidade dos espaços de ensino das instalações das instituições de ensino superior [PDF]. Retirado de

https://wwwcdn.dges.gov.pt/sites/default/files/nota_sobre_calculo_de_capacidade.pdf - Acedido a 02/04/2020

Dilberoglu, U., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. (2017). The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11, 545-554. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148 Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.148> - Acedido 24/05/2020

Dombrowski, U., Richter, T., & Krenkel, P. (2017). Interdependencies of Industrie 4.0 & Lean Production Systems: a use cases analysis. *27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM2017)*, Modena Italy, 11, 1061-1068. doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.217 Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.217> - Acedido a 24/02/2018

Efstratia, D. (2014). Experiential Education through Project Based Learning. *Procedia - Social And Behavioral Sciences*, 152, 1256-1260. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.09.362> - Acedido a 16/05/2020

Fedorov, A., Goloschchapov, E., Ipatov, O., Potekhin, V., Shkodyrev, V. & Zobnin, S. (2015). Aspects of Smart Manufacturing Via Agent-based Approach. *Procedia Engineering*, 100, 1572-1581. Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815005573> - Acedido a 09/06/2018

Francalanza, E., Borg, J. & Constantinescu, C. (2017). A knowledge-based tool for designing cyber physical production systems. *Computers and Industry*, 84, 39-58. Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361516301373> - Acedido 04/04/2018

Gurr, M., & Mülhaupt, R. (2016). Rapid Prototyping. doi: 10.1016/b978-0-12-803581-8.01477-6. Retirado de <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.01477-6> - Acedido a 5/07/2019

Goerke, M., Schmidt, M., Busch, J., & Nyhuis, P. (2015). Holistic Approach of Lean Thinking in Learning Factories. *Procedia CIRP*, 32, 138-143. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.221> - Acedido a 16/05/2020

Hajrizi, E. (2016). Smart Solution for Smart Factory. *IFAC-PapersOnLine*, 49(29), 1-5. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.052> - Acedido a 26/05/2018

- Haller, S., Karnouskos, S. & Schroth, C. (2008). The Internet of Things in an Enterprise Context, in J. Domingue, F. Dieter & P. Traverso (Eds), *Future Internet Symposium* (pp. 14–28). Retirado de <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-642-00985-3.pdf> - Acedido a 15/04/2018
- Hanushek, E. A., & Woessmann, L. (2007) The Role of Education Quality in Economic Growth, World Bank Human Development Network Education Team, Washington, DC. Retirado de <https://elibrary.worldbank.org/doi/abs/10.1596/1813-9450-4122> - Acedido a 08/01/2019
- Hermann, M., Pentek, T., & OTTO, B. (2016). Design principles for industrie 4.0 scenarios. *Proceedings of the Annual: 49th Hawaii International Conference on System Sciences*. 3928–3937, 2016. Retirado de <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29269.22248> - Acedido a 22/02/2018
- Initiative on European Learning Factories (2013) General Assembly of the Initiative on European Learning Factories, IELF, Munich. In Abele, E., Chryssolouris, G., Sihn, W., Metternich, J., ElMaraghy, H., ... & Seifermann, S. (2017). Learning factories for future oriented research and education in manufacturing. Vol. 66, Ed. 2, 803-826. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.05.005> - Acedido 18/03/2019
- Ivanov, D., Sokolov , B. & Ivanova , M. (2016). Schedule coordination in cyber-physical supply networks Industry 4.0. *IFAC-PapersOnLine*, 49 (12), 839–844. Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S240589631631165X> - Acedido 04/04/2018
- Jazdi, N. (2014). Cyber Physical Systems in the Context of Industry 4.0. *IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics*, Germany, pp. 1–4. Retirado de <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6857843> - Acedido a 15/04/2018
- Jorgensen, J.E., Lamancusa, J.S., Zayas-Castro, J.L., & Ratner, J. (1995) The Learning Factory: Curriculum Integration Of Design And Manufacturing. 4th World Conference on Engineering Education 1–7. Retirado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.89.6057&rep=rep1&type=pdf> - Acedido a 22/02/2019

- Jovane, F., Westkämper, E., & Williams, D.J. (2009) *The ManuFuture Road: Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing*, Springer, Berlin. Retirado de <https://www.worldcat.org/title/manufuture-road-towards-competitive-and-sustainable-high-adding-value-manufacturing/oclc/1005790286> - Acedido 14/01/2019
- Kagermann. H., Wolfgang, W., & Helbig, J. (2013). *Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group* [PDF]. Retirado de <https://www.din.de/blob/76902/e8cac883f42bf28536e7e8165993f1fd/recommendations-for-implementing-industry-4-0-data.pdf> – Acedido a 24/02/2018
- Kreimeier, D., Morlock, F., Prinz, C., Krückhans, B., Bakir, D.C., Meier, H. (2014) Holistic Learning Factories—A Concept to Train Lean Management, Resource Efficiency as well as Management and Organization Improvement Skills. 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 17: 184-188. Retirado de <https://core.ac.uk/download/pdf/82050418.pdf> - Acedido a 18/03/2019
- Kyriazis, D. & Varvarigou, T. (2013). Smart, Autonomous and Reliable Internet of Things. *Procedia Computer Science*, 21,442–448. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.09.059> - Acedido a 15/04/2018
- LabCom/UBI, C. (2019). Laboratório de Fabricação da UBI inaugurado @ urbi.ubi.pt. Retirado de <http://www.urbi.ubi.pt/pag/15722>- Acedido a 29/12/2019
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems, *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. Retirado de: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001> – Acedido a 24/03/2018
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*. 55(12), 3609-3629. Retirado de <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576> - Acedido a 20/02/2018
- Lukač, D. (2015). The fourth ICT-based industrial revolution "Industry 4.0" : HMI and the case of CAE/CAD innovation with EPLAN P8. *23rd Telecommunications Forum Telfor (TELFOR)*. pp. 835–838. Retirado de -

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7377595> – Acedido a 20/02/2018

Metternich, J., Abele, E., & Tisch, M. (2013) Current Activities and Future Challenges of the Process Learning Factory CiP. in Reinhart G, Schnellbach P, Hilgert C, Frank SL (Eds.). 3rd Conference on Learning Factories Munich. Augsburg 94-107. - Acedido a 16/03/2019

Monostori, L., Kadar, B., Bauernhansl, T., Kondoh, S., Kumara, Reinhart, G., ... Ueda, K., (2016). Cyber-physical Systems in Manufacturing. *CIRP Ann.-Manuf. Technol.* 65(2), 621–641. doi: 10.1016/j.cirp.2016.06.005 Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.005> – Acedido 24/03/2018

Mokyr, J. (1998). The Second Industrial Revolution, 1870-1914. Sheridan Rd., Evanston IL 60208: Northwestern University. Retirado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.478.7503&rep=rep1&type=pdf> – Acedido 11/05/2020

Mrugalska, B. & Wyrwicka, M. K. (2017). Towards Lean Production in Industry 4.0. *7th International Conference on Engineering, Project, and Production Management. Procedia Engineering*, Polonia, 182, 466–473. Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817312717> - Acedido a 24/02/2018

Noorani, R. (2006). “Rapid Prototyping. Principles and Applications Hoboken: Wiley”. Retirado de [https://www.wiley.com/en-
pt/Rapid+Prototyping:+Principles+and+Applications-p-9780471730019](https://www.wiley.com/en-
pt/Rapid+Prototyping:+Principles+and+Applications-p-9780471730019) - Acedido: 02/07/2019

Otto, K., & Wood, K. (2001). "Product Design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development". Retirado de [https://research.aalto.fi/en/publications/product-design-techniques-in-reverse-engineering-and-new-product-development\(186641ed-e06e-4c9a-8e18-8ff0108215ae\).html](https://research.aalto.fi/en/publications/product-design-techniques-in-reverse-engineering-and-new-product-development(186641ed-e06e-4c9a-8e18-8ff0108215ae).html) - Acedido a 01/07/2019

Pereira, A.C., & Romero, F. (2017) A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017*, 28-30 June 2017, Vigo (Pontevedra), Spain, 1206–

1214. Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917306649> - Acedido a 10/10/2018
- Portaria nº 53/71 de 3/2 dos Ministérios da Economia, das Corporações e Previdência Social e da Saúde e Assistência (1971). Diário do Governo n.º 28/1971, Série I de 1971-02-03. Retirado de <https://dre.pt/pesquisa/-/search/446313/details/maximized> - Acedido a 13/04/2020
- Portaria nº 702/80 de 22/9 dos Ministérios do Trabalho, dos Assuntos Sociais, da Agricultura e Pescas e da Indústria e Energia (1980). Diário da República n.º 219/1980, Série I de 1980-09-22. Retirado de <https://dre.pt/pesquisa/-/search/460474/details/maximized?perPage=50&sort=whenSearchable&q=Lei+n.%C2%BA%2010%2F97&sortOrder=ASC/en> - Acedido a 13/04/2020
- Reith, S. (1988) *Auerbetriebliche CIM-Schulung in der "Lernfabrik"*. Retirado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-01109-6_24 - Acedido a 22/02/2019
- Roblek, V., Meško, M. & Krapež, A. (2016). A complex view of Industry 4.0, SAGE Open, 6(2). Retirado de <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/2158244016653987> - Acedido a 15/04/2018
- Sackey, S.M., Bester, A., & Adams, D. (2017). Industry 4.0 Learning Factory didactic design parameters for industrial engineering education in South Africa, S. Afr. J. Ind. Eng. vol.28 n.1 Pretoria. Retirado de <https://doi.org/10.7166/28-1-1584> - Acedido a 23/03/2019
- Sass, L. & Oxman, R. (2006). Materializing design: the implications of rapid prototyping in digital design. *Design Studies* 27, pp. 325–355 Retirado de <http://usir.salford.ac.uk/id/eprint/507/> - Acedido a 01/07/2019
- Schmidt, R., Möhring, M., Härting, R.C., Reichstein, C., Neumaier, P. & Jozinovic', P. (2015). Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results. *International Conference on Business Information Systems, Springer International Publishing LNBP*, Germany, pp. 16–27. Retirado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-19027-3_2 - Acedido a 29/09/2018

- Schuster, K., Groß, K., Vossen, R., Richert, A. & Jeschke, S. (2015). Preparing for Industry 4.0 — collaborative virtual learning environments in engineering education, The International Conference on E- Learning in the Workplace, (ICELW), New York, NY, USA, 10-12 June, pp. 1-6. Retirado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-46916-4_36 - Acedido a 23/03/2019
- Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C. & Hauptvogel, A (2013). Sustainable Increase of Overhead Productivity due to Cyber-Physical-Systems. *Global Conference on Sustainable Manufacturing*, Germany, 23, 332-335. Retirado de http://www.gcsm.eu/Papers/90/10.6_150.pdf - Acedido a 21/02/2018
- Shafiq, S. I., Sanin, C., Szczerbicki, E., & Toro, C. (2015). Virtual Engineering Object / Virtual Engineering Process: A specialized form of Cyber Physical System for Industrie 4.0”. *The 19th International Conference on Knowledge Based in Intelligente Information and Engineering Systems. Procedia Computer Science*, 60, 1146-1155. doi: 10.106/j.procs.2015.08.166. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.166> – Acedido a 26/02/2018
- Shariatzadeh, N., Lundholm, T., Lindberg, L. & Sivard, G. (2016). Integration of digital factory with smart factory based on Internet of Things. *Procedia CIRP*, 50, 512–517. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.05.050> - Acedido a 14/04/2018
- Steffen, M., Frye, S., & Deuse, J. (2013a) Vielfalt Lernfabrik—Morphologie zu Betreiben, Zielgruppen und Ausstattungen von Lernfabriken im Industrial Engineering. *Werkstattstechnik online: wt* 103(3):233–239. Retirado em https://www.researchgate.net/publication/285906517_Vielfalt_Lernfabrik - Acedido a 16/03/2019
- Steffen, M., Frye, S., & Deuse, J. (2013b) The only Source of Knowledge is Experience: Didaktische Konzeption und methodische Gestaltung von Lehr-Lern-Prozessen in Lernfabriken zur Aus- und Weiterbildung im Industrial Engineering TeachING LearnING.EU. *Innovationen für die Zukunft der Lehre in den Ingenieurwissenschaften*, 117–129. Retirado de https://www.researchgate.net/publication/310624759_The_only_Source_of_Knowledge_is_Experience_-_Didaktische_Konzeption_und_methodische_Gestaltung_von_Lehr-Lern-

Prozessen in Lernfabriken zur Aus-
und Weiterbildung im Industrial Engineering - Acedido a 16/03/2019

- Thames, L. & Schaefer, D. (2016). Software-Defined Cloud Manufacturing for Industry 4.0, *Procedia CIRP*, 52(2016), 12–17. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.041> - Acedido a 15/04/2018
- The Industrial Internet Consortium. A global nonprofit partnership of industry, government and academia. (2014). Retirado de <http://www.iiconsortium.org> - Acedido a 24/02/2018
- Thoben, K. D., Wiesner, S., & Wuest, T. (2017). Industrie 4.0” and Smart Manufacturing: A Review of Research Issues and application exemples. Retirado de [https://www.researchgate.net/publication/312069858_Industrie_40_and_Smart_Manufacturing - A Review of Research Issues and Application Examples](https://www.researchgate.net/publication/312069858_Industrie_40_and_Smart_Manufacturing_-_A_Review_of_Research_Issues_and_Application_Examples) - Acedido a 22/02/2018
- Tisch, M., Hertle, C., Cachay, J., Abele, E., Metternich, J., & Tenberg, R. (2013) A Systematic Approach on Developing Action-oriented, Competency-based Learning Factories. 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 7: 580-585. Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113003053> Acedido a 16/03/2019
- Tisch, M., Hertle, C., Abele, E., Metternich, J., & Tenberg, R. (2015b) Learning Factory Design: A Competency-Oriented Approach Integrating Three Design Levels. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 29(12):1355–1375. Retirado de <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/0951192X.2015.1033017?scroll=top&needAccess=true> - Acedido a 31/03/2019
- Tisch, M., & Metternich, J. (2017) Potentials and Limits of Learning Factories in Research, Innovation Transfer, Education, and Training. *7th CIRP-sponsored Conference on Learning Factories*. *Procedia Manufacturing* 9: 89–96. Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917301452> - Acedido a 22/02/2019
- Tisch, M., Ranz, F., Abele, E., Metternich, J., & Hummel, V. (2015a) Learning Factory Morphology: Study on Form and Structure of an Innovative Learning Approach in

- the Manufacturing Domain. TOJET July 2015 Special Issue 2 for International Conference on New Horizons in Education 2015 356–363. Retirado em <https://publikationen.reutlingen-university.de/frontdoor/deliver/index/docId/500/file/500.pdf> - Acedido a 16/03/2019
- U.B.I (2019). UBI - Universidade da Beira Interior. Retirado de <https://www.ubi.pt/Entidade/C-MAST>. – Acedido a 30/12/2019
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233-238. Retirado de <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034> - Acedido a 13/05/2020
- Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM): termos fundamentais e gerais. 1ª edição Luso-Brasileira. Lisboa: Instituto Português da Qualidade, 2012. Retirado de http://www1.ipq.pt/PT/Metrologia/Documents/VIM_IPQ_INMETRO_2012.pdf - Acedido a 17/04/2019.
- Wagner, U., AlGeddawy, T., ElMaraghy, H, & Müller, E. (2012) The State-of-the-Art and Prospects of Learning Factories. *45th CIRP Conference on Manufacturing Systems*. *Procedia CIRP* 3: 109-114. Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112001928> - Acedido a 16/03/2019
- Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., & Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0: Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *IFAC-PapersOnline*. 48(3), 579-584. Retirado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315003821> - Acedido a 22/02/2018
- Wojtyła, S., Klama, P., & Baran, T. (2017). Is 3D printing safe? Analysis of the thermal treatment of thermoplastics: ABS, PLA, PET, and nylon. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 14(6), D80–D85. Retirado de <https://doi.org/10.1080/15459624.2017.1285489> - Acedido a 15/04/2020
- Womack, J. P., Jones, D. T. & Roos, D. (2008). *The Machine that Changed the World*. Simon and Schuster. Retirado de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hfm.4530040310> - Acedido a 01/07/2019

Xu, L. (2016). Editorial inaugural issue. *Journal of Industrial Integration and Management*, 1 (1) Retirado de <https://www.worldscientific.com/doi/pdf/10.1142/S2424862216010016> - Acedido a 15/04/2018

Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015). "Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges". *12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*. pp. 2147–2152. Retirado de <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7382284> - Acedido a 22/02/2018

Anexo 1 – Primeira Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Modelo Operacional – Adaptado de Tisch et al., 2015a

1.1	Operador	Instituição Académica			Instituição					Operação Lucrativa		
		Universidade	Faculdade	Bacharelato	Escola Vocacional Ensino Secundário	Câmara	União	Associação de Empregados	Rede Industrial	Consultadoria	Empresa de Produção	
1.2	Formando	Professor		Investigador		Estudante Assistente		Técnico Especialista		Consultor		Formador
1.3	Desenvolvimento	Desenvolvimento Próprio			Desenvolvimento Assistido Externamente				Desenvolvimento Externo			
1.4	Fundos Iniciais	Fundos internos			Fundos públicos				Fundos de empresas			
1.5	Fundos Desenvolvimento	Fundos internos			Fundos públicos				Fundos de empresas			
1.6	Prazo de financiamento	Curto Prazo			Médio longo prazo (< 3 anos)				Longo prazo (> 3 anos)			
1.7	Modelo negócio para formação	Modelo Aberto					Modelo Fechado					
		Modelo Clube			Propinas do curso		Programa de formação só para uma empresa					

Anexo 2 – Segunda Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Propósitos – Adaptado de Tisch et al., 2015a

2.1	Propósito Principal	Educativo			Treino Vocacional				Investigação							
2.2	Propósito Secundário	Ambiente de Teste / Ambiente Piloto			Produção Industrial			Inovação			Propaganda para a Produção					
2.3	Grupos Alvo para Ensino e Treino	Pupilos	Estudantes			Empregados							Empreendedores	Empregados por conta própria	Desempregados	Aberto ao Público
			Bacharelato	Mestrado	Doutoramento	Aprendizes	Experientes	Alguma Experiência	Sem Experiência	Gestores						
										Baixo	Médio	Topo				
2.4	Constituição	Homogéneo			Heterogéneo (Conhecimento, Hierárquica, Estudantes + Empregados, etc.)											
2.5	Indústrias Alvo	Mecânica		Automóvel	Logística		Transportes		Química		Eletrónica					
		Construção		Têxtil	Banca/Seguros		Aeroespacial		FMCG		...					
2.6	Conteúdos Relevantes de Aprendizagem	Gestão da Produção e Organização	Eficiência de Recursos	CPPS	HMI	Automação	Design	Gestão Lean		Design de Sistemas de Trabalho		Design Intralogístico e Gestão				
2.7	Papel da L.F. para Investigação	Objeto de Investigação					Possibilitador de Investigação									
2.8	Tópico de Investigação	Gestão da Produção e Organização		Eficiência de Recursos	Gestão Lean		CPPS	HMI	Automação		Mudança		Didática			

Anexo 3 – Terceira Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Processos – Adaptado de Tisch et al., 2015a

3.1	Ciclo de Vida do Produto	Planeamento do Produto	Desenvolvimento do Produto	Design do Produto	Prototipagem Rápida	Serviço	Reciclagem	Produção	Assemblagem	Logística
3.2	Ciclo de Vida da Fábrica	Planeamento e Investimento	Conceção da Fábrica	Planeamento do Processo	Arranque	Manutenção	Reciclagem			
3.3	Ciclo de Vida do Pedido	Configuração e Pedido	Sequência do Pedido	Planeamento da Produção e Agendamento		Recolha Embalamento	Expedição			
3.4	Ciclo de Vida Tecnologia	Planeamento	Desenvolvimento	Testes Virtuais		Manutenção	Modernização			
3.5	Função Indireta	Gestão de Cadeia de Abastecimentos		Gestão da Qualidade		Recursos Humanos	Compras	Vendas	Financeiro	
3.6	Fluxo do Material	Produção Contínua				Produção Discreta				
3.7	Tipo de Processo	Produção em Massa		Produção Série		Pequenas Séries de Produção		Produção Pontual		
3.8	Organização da Produção	Produção em Sítio Fixo		Produção em Banca		Oficina de Produção		Produção em Fluxo		
3.9	Grau de Automação	Totalmente Automatizada			Parcialmente Automatizada			Manual		
3.10	Métodos de Produção	Corte	Modelagem Tradicional	Produção Aditiva	Conformação	Capeamento	Junção	Mudança de Propriedades		
3.11	Tecnologias de Produção	Química			Biológica			Física		

Anexo 4 – Quarta Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Configuração – Adaptado de Tisch et al., 2015a

4.1	Ambiente de Ensino	Puramente Físico	L.F. Física com Suporte da Fábrica Digital	Fluxo Físico da L.F. Estendido Digitalmente	Puramente Virtual	
4.2	Escala	Reduzido à Escala			Formato Real	
4.3	Níveis de Sistema de Trabalho	Local de Trabalho	Sistema de Trabalho	Fábrica		Rede
4.4	Possibilitadores de Mudança	Mobilidade	Modularidade	Escala	Universal	Compatibilidade
4.5	Dimensões de Mudança	Lay out e Logística	Características do Produto	Design do Produto	Tecnologia	Quantidades do Produto
4.6	Integração IT	IT Antes do Início de Produção (CAD, CAM, Simulação)		IT Depois do Início de Produção (PPS, ERP, MES)		IT Depois da Produção (CRM, PLM)

Anexo 5 – Quinta Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Produto – Adaptado de Tisch et al., 2015a

5.1	Materialidade	Material (Produto Físico)			Imaterial (Serviço)		
5.2	Forma do Produto	Carga Geral			Granel		
5.3	Origem do Produto	Desenvolvimento Próprio		Devolvido pelos Participantes		Desenvolvimento Externo	
5.4	Mercado do Produto	Disponível no Mercado	Disponível no Mercado mas em Versão Didática		Funcional e poderá estar disponível no mercado		Sem Função / Demonstração
5.5	Nº de Produtos Diferentes	1	2	3 a 4	Mais de 4	Flexível, Desenvolvido pelos Participantes	Aceitação de Pedidos Reais
5.6	Nº de Variantes	1	2 a 4	5 a 20	...	Flexível, Dependendo dos Participantes	Determinado pelos Pedidos Reais
5.7	Nº de Componentes	1	2 a 5	6 a 20	21 a 50	51 a 100	Mais de 100
5.8	Uso Futuro	Reutilizáveis	Exibição		Doar	Venda	Sem Fim

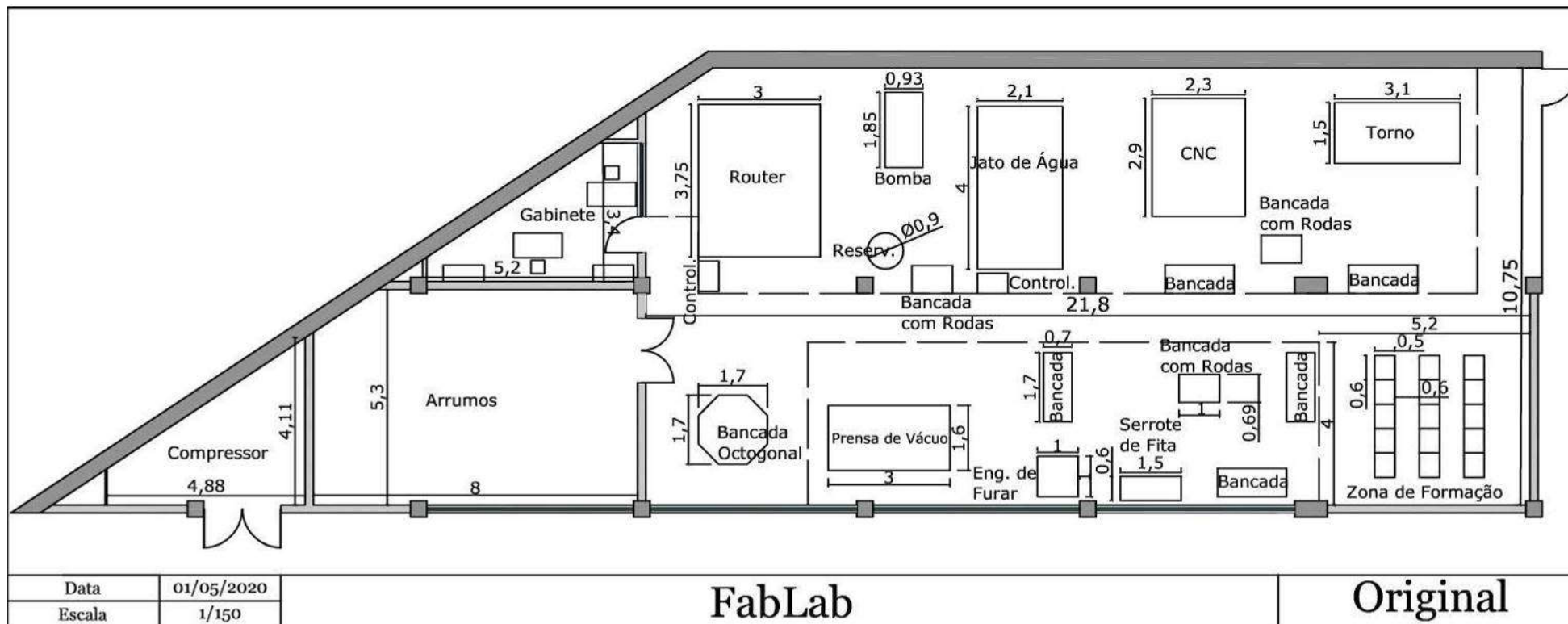
Anexo 6 – Sexta Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Didática – Adaptado de Tisch et al., 2015a

6.1	Classes de Competência	Técnica e Metodológica	Social e Comunicativa	Competências Pessoais		Atividade e Implementação Orientada de Competências	
6.2	Dimensões dos Objetivos de Ensino	Cognitiva		Afetiva		Psicomotora	
6.3	Cenário Estratégico de Ensino	Instrutivo	Demonstrativo		Cenário Fechado		Cenário Aberto
6.4	Ambiente de Ensino	Greenfield (Criação do Ambiente da Fábrica)			Brownfield (Melhoria do Ambiente Existente na Fábrica)		
6.5	Canais de Comunicação	Aprendizagem no Local			Conexão Remota		
6.6	Grau de Autonomia	Instruído		Autoguiado / Autorregulado		Autodeterminado / Auto-Organizado	
6.7	Papel do Orientador	Apresentador	Moderador		Formador		Instrutor
6.8	Tipo de Treino	Tutorial	Práticas Laboratoriais	Seminários	Workshop		Projeto
6.9	Estandarização do Ensino	Ensino Estandarizado			Ensino Customizado		
6.10	Fundamentos Teóricos	Pré-requisito	Em avanço	Alternado com as Práticas	Conforme a Procura		Depois
6.11	Níveis de Avaliação	Feedback dos Participantes	Aprendizagem dos Participantes	Transferência para a Fábrica Real	Impacto Económico do Ensino		Retorno do Ensino
6.12	Avaliação do Sucesso de Aprendizagem	Testes Escritos	Testes Orais	Relatórios Escritos	Apresentação Oral	Exame Prático	Nenhum

Anexo 7 – Sétima Dimensão do Modelo Descritivo Multidimensional do CWG CIRP – Métricas – Adaptado de Tisch et al., 2015a

7.1	Nº de Participantes por Sessão	1 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 30	Mais de 30	
7.2	Nº de Sessões Estandarizadas	1	2 a 4		5 a 10	Mais de 10	
7.3	Duração Média de Cada Sessão	Menos de 1 Dia	1 a 2 Dias	3 a 5 Dias	5 a 10 Dias	10 a 20 Dias	Mais de 20 Dias
7.4	Nº de Participantes por Ano	Menos de 50	50 a 200	201 a 500	501 a 1000	Mais de 1000	
7.5	Capacidade Ocupada	Menos de 10%	10% a 20%	20% a 50%	50% a 75%	75% a 100%	
7.6	Dimensão da L.F.	Menos 100 m ²	100 m ² a 300 m ²	300 m ² a 500 m ²	500 m ² a 1000 m ²	Mais de 1000 m ²	
7.7	Full Time Equivalent na L.F.	Menos de 1	2 a 4	5 a 9	10 a 15	Mais de 15	

Anexo 8 – Planta Original do FabLab – Elaboração Própria



Anexo 9 – Proposta de Modificação da Planta do FabLab – Elaboração Própria

